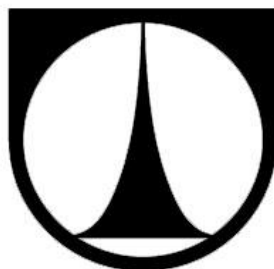


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
FAKULTA STROJNÍ



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

Studijní program N2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie  
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie

**Sledování vlivu teploty okolí na mechanické vlastnosti jádrových směsí s ohledem na jejich typ a rozměr ostřiva**

**Observation of the influence which has the temperature of the surrounding on mechanical features of the core mixtures with respect to their type and the size of the grog**

Bc. Romana Bruthansová

**KSP – SM – 571**

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

Ing. Miroslav Taraba

**Rozsah práce a příloh:**

Počet stran	99
Počet tabulek	33
Počet grafů	17
Počet obrázků	41
Počet příloh	0

**Datum:** 03.01.2014

**zadání**

**A N O T A C E**  
**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**  
**Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství

Student: Bc. Romana Bruthansová

Téma práce: Sledování vlivu teploty okolí na mechanické vlastnosti  
jádrových směsí s ohledem na jejich typ a rozměr ostřiva

Observation of the influence which has the temperature of  
the surrounding on mechanical features of the core mixtures  
with respect to their type and the size of the grog

Číslo DP: KSP – SM – 571

Vedoucí DP: prof. Ing. Iva Nová, CSc.- *TU v Liberci*

Konzultant DP: Ing. Jiří Machuta, Ph.D.- *TU v Liberci*  
Ing. Miroslav Taraba – *Unitherm s.r.o., Jablonec n.N.*

**Abstrakt:**

Tato diplomová práce se zabývá sledováním vlivu teploty okolí na mechanické vlastnosti, konkrétně pevností ve střihu a ohybu, jádrových směsí s ohledem na druh ostřiva. V teoretické části je popsána výroba jader z různých druhů pojiv a ostřiv, vlastnosti jádrové formovací směsi a vliv teploty okolí závisující na ostřivu. V experimentální části diplomové práce se vyrábí různé typy jádrových směsí a zkouší se mechanické vlastnosti, které jsou závislé na teplotě okolí ostřiva. V závěru práce je zhodnocení výsledků mechanických vlastností na jednotlivých jádrových směsí a vyhodnocení vlivu teploty okolí na ostřiva. Tato diplomová práce byla vypracována v rámci řešení projektu SGS 28005.

**Abstract:**

This diploma thesis deals with observing the influence of the temperature of the surrounding on mechanical features, particularly the firmness in the cut and blending, core mixture with respect on the kind of grog. In the theoretical part, there is the production of cores from various kinds of binder and clay, the features of the core forming mixture and the influence of temperature of the surrounding, which is dependent on the grog, described. In the practical part, various types of core mixture are being made and the mechanical features, which are dependent on the temperature of the surrounding of the grog, are examined. In the conclusion of the thesis, there is the evaluation of the results of mechanical features of each core mixture and evaluation of the temperature of the surrounding of the grog. This diploma thesis was developed within project SGS 28005.

### **Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 03.01.2014

.....

Bc. Romana Bruthansová

Husova 253/48

46001 Liberec 5

## **Poděkování:**

Tímto bych ráda poděkovala vedení společnosti Unitherm, s.r.o. za poskytnutí materiálů pro experimentální část diplomové práce, panu Ing. Miroslavu Tarabovi za odborné vedení a věcné připomínky díky letitým zkušenostem, dále Martinovi Žďárskému a dalším kolegům za odbornou pomoc při řešení diplomové práce ve společnosti Unitherm, s.r.o. Také bych velmi ráda poděkovala prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za konzultace a vedení diplomové práce a Ing. Jiřímu Machutovi, Ph.D. za odbornou pomoc při řešení diplomové práce v laboratořích Technické Univerzity v Liberci.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala rodině a přítelovi za finanční a psychickou podporu nejen v období psaní diplomové práce, ale také v průběhu celého studia.



# **OBSAH**

<b>OBSAH.....</b>	<b>6</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2. TEORETICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>11</b>
2.1. Ostřiva formovacích směsí .....	11
2.1.1. Křemenná ostřiva .....	13
2.1.2. Nekřemenná ostřiva .....	16
2.2. Pojiva formovacích směsí .....	18
2.2.1. Pojiva I. generace .....	20
2.2.2. Pojiva II. Generace .....	20
2.2.3. Pojiva III. Generace .....	27
2.2.4. Pojiva IV. Generace .....	28
2.3. Způsoby výroby jader .....	28
2.3.1. Ruční výroba jader v jaderníku .....	29
2.3.2. Strojní výroba jader v jaderníku .....	29
2.3.3. Výroba jader metodou CT .....	30
2.3.4. Výroba jader metodou podle Croninga .....	31
2.3.5. Hot-Box metoda .....	31
2.3.6. Cold-Box metoda .....	32
2.3.7. Výroba jader metodou ST .....	32
2.4. Vlastnosti jádrové formovací směsi .....	33
2.4.1. Zkoušky ke zjištění pevnosti směsi .....	34
2.4.2. Zkouška ke zjištění prodyšnosti směsi .....	36
2.4.3. Stanovení vlhkosti směsi .....	37
2.5. Vliv teploty okolí na jednotlivé složky jádrové směsi .....	38
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>39</b>



3.1. Charakteristika použitých ostřiv .....	39
3.1.1. Slévárenský písek ST 53.....	39
3.1.2. Slévárenský písek SP 28 .....	41
3.2. Použitá pojiva .....	42
3.2.1. Ecolotec.....	43
3.2.2. Desil J .....	43
3.2.3. Geopol 618.....	43
3.3. Přístroje použité v experimentální části .....	44
3.3.1. Přístroj na stanovení pevnosti LRu-2e.....	44
3.3.2. Laboratorní kolový míšič LM-2e .....	46
3.3.3. Průběžný míšič .....	47
3.3.4. Jaderníky .....	48
3.3.5. Ostatní přístroje .....	50
3.4. Příprava jádrových směsí .....	52
3.5. Zkoušení mechanických vlastností .....	55
3.5.1. Ostřivo ST 53, pojivo Ecolotec.....	57
3.5.2. Ostřivo SP 28, pojivo Ecolotec.....	58
3.5.3. Vyhodnocení mechanických zkoušek CT- jádrových směsí s pojivem Ecolotec .....	60
3.5.4. Ostřivo ST 53, pojivo Desil J .....	62
3.5.5. Ostřivo SP 28, pojivo Desil J .....	63
3.5.6. Vyhodnocení mechanických zkoušek CT- jádrových směsí s pojivem Desil J .....	65
3.5.7. Ostřivo ST 53, pojivo Geopol 618.....	66
3.5.8. Ostřivo SP 28, pojivo Geopol 618.....	68
3.5.9. Vyhodnocení mechanických zkoušek CT- jádrových směsí s pojivem Geopol 618... ..	69
3.5.10. Ostřivo ST 53, pojivo Geopol 618 – ST .....	71
3.5.11. Ostřivo SP 28, pojivo Geopol 618 – ST .....	72
3.5.12. Vyhodnocení mechanických zkoušek ST- jádrových směsí s pojivem Geopol 618..	74
3.5.13. Ostřivo ST 53, pojivo Geopol 618 – ST .....	75





3.5.14. Vyhodnocení mechanických zkoušek ST-jádrové směsi s pojivem Geopol 618 .....	76
<b>4. DISKUZE, VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>79</b>
<b>5. ZÁVĚR .....</b>	<b>88</b>
<b>6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>91</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>93</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>95</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>97</b>



## **SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$d_{50}$ [mm]	velikost středního zrna
$F$ [N]	síla
$M$ [g.mol <sup>-1</sup> ]	molární hmotnost
$m$ [kg]	hmotnost
max	maximální hodnota měření
min	minimální hodnota měření
$m_s$ [g]	hmotnost vysušeného vzorku
$m_v$ [g]	hmotnost vlhkého vzduchu
$S$ [m <sup>2</sup> ]	plocha, průřez
SP 28	typ kulatého ostřiva
ST 53	typ ostrohranného ostřiva
$T$ [°C]	teplota
$t$ [s,min,hod]	čas
$Q_v$ [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok
$w_p$ [%]	poměrná relativní vlhkost
$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota
$\varepsilon$ [-]	emisivita
$\sigma_{OHYB}$ [kPa]	pevnost v ohybu
$\sigma_{STŘIH}$ [kPa]	pevnost ve stříhu
$\sigma_{tl}$ [MPa]	pevnost v tlaku
$\Sigma$	součet
$\bar{x}$	aritmetický průměr

## **1. ÚVOD**

Slévárenství je jedna z netřískových technologií, představuje výrobu velmi členitých a tvarově složitých odlitek, které se vyznačují rádiusy a úkosalostmi. Tyto odlitky mají uplatnění nejen v automobilovém, ale i v elektro a textilním průmyslu, v neposlední řadě se lze setkat s odlitky v uměleckém odvětví. Odlitky jsou vyráběny pomocí lití roztaveného kovu, resp. slitiny kovů do dutiny slévárenské formy, která je vyrobena ze žáruvzdorného materiálu, jehož dutina odpovídá svým tvarem negativu budoucího odlitku. Po vyplnění slévárenské formy kovem a po jeho ztuhnutí se získává odlitek.

Výroba odlitek představuje složitý výrobní cyklus, kde je nutné časové sladění jednotlivých operací, rozdíl je mezi výrobou odlitek pomocí vysokotlakého lití, lití do kokil či lití do písku, kterým se zabývá tato diplomová práce. Před samotnou výrobou odlitek musí být připraveny formovací rámy, modely nebo modelové desky, formovací směs, formovací zařízení, a musí být v předstihu vyrobena jádra. V úpravě formovacího i jádrového materiálu se připravuje příslušná formovací, resp. jádrová směs (smíchávají se příslušné složky – ostřivo, pojivo). Formovací směs se plní formovací rámy s modelem nebo rámy s formovací deskou a následným spěchováním se vyrábí dutiny slévárenských forem.

Jádra se vyrábí příslušnou technologií v jadernách, pomocí tzv. jaderníků (formy pro výrobu jader). Po vyjmutí modelu z formy a vložení jádra zůstává ve formě dutina, jejíž tvar a rozměry odpovídají budoucímu odlitku. Je-li dutina formy tvarově složitá, pak se nevyrábí formováním modelu, ale skládáním nepravých jader do rámu. Vzhledem k tomu, že na jádra jsou kladeny při ukládání do forem, ale i při lití kovu vysoké pevnostní podmínky, se tato diplomová práce zabývá sledováním mechanických vlastností, konkrétně pevnostmi ve stříhu a ohybu na vytvořených zkušebních tělesech z různých druhů jádrových směsí. V diplomové práci se vyhodnocují pevnosti z jádrových směsí z různých druhů jak ostřiva, tak i pojiva, které jsou vytvrzeny jak pomocí  $\text{CO}_2$ , tak samovolně. Zároveň se sleduje vliv teploty vnějšího okolí na slévárenský písek, resp. ostřiva na mechanické vlastnosti jádrových směsí.

## **2. TEORETICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Teoretická část se zabývá literární rešerší nejčastěji používaných surovin ve slévárnách. V první řadě je rozdělení ostřiv a pojiv, následně se teoretická část ubírá směrem k jádrovým směsím a výrobě jader. Nedílnou součástí jsou zároveň vlastnosti směsí a základní zkoušky jádrových směsí.

Ideální formovací i jádrová směs je finančně výhodná, nesmáčivá, dostatečně tekutá látka. Je to látka, která po styku s modelem ihned ztuhne za normálních teplot a vytvoří tenké stěny o vysoké pevnosti a po dokončení výroby se znovu může zregenerovat a tak nezatěžovat životní prostředí. To vše splnit u formovacích či jádrových směsí však v reálu není vůbec možné.

Formovací směs může být modelová, kdy je modelová směs sypána přímo na model, či výplňová, která vyplňuje zbývající objem formovacího rámu. U výplňové formovací směsi není až takový důraz na kvalitu jako u modelové směsi. Formovací směs může být i jádrová, kdy se tato velmi kvalitní směs používá pro výrobu jader. Připravuje se nejčastěji z nových surovin vysoké jakosti (kladou se na ni vyšší nároky než na směs modelovou). Jádrová směs je velmi tepelně namáhána a musí odolávat pronikání taveniny mezi póry jádra. Musí mít také dobrou rozpadavost po odlití a delší skladovatelnost jader.

Formovací směs je složena z ostřiva, což je zrnitý materiál, tvořící hlavní objem směsi a skelet forem a jader. Dohromady s ostřivem tvoří celek pojivo, látka nebo směs tvořící pojivovou soustavu, která dodává směsi vaznost a plastičnost za syrova, pevnost po vytvrzení i za vysokých teplot při lití i po odlití (rozpadavost).

### **2.1. Ostřiva formovacích směsí**

Ostřivo je nejdůležitější složkou formovací a jádrové směsi. Je to tvrdá složka ve formovací směsi, tvoří její nosnou část. Jedná se o žáruvzdorný, zrnitý materiál tvořící až 98 [%] hmotnosti formovací směsi. Formovací směsi ostřivo též udává potřebnou pevnost v tlaku. Velikost zrna ostřiva by neměla být menší než 0,02 [mm]. Menší částice než je udaná hodnota se řadí do vyplavitelného podílu



(křemenný prach, neplastické částice, jiné materiály). Velikost těchto menších částic se stanoví plavící zkouškou.

Velikost zrn ostřiva spolu s tvarem a stejnoměrností zrn má zásadní význam pro výsledné technologické vlastnosti formovací či jádrové směsi. Vedle těchto vlastností je důležitá i chemická podstata ostřiva. Podle chemické povahy se ostřiva rozdělují na kyselá (křemenná ostřiva), neutrální (šamot, korund, chromit, zirkon) a zásaditá (magnezit, chrommagnezit, magnezitchrom).

Kyselá ostřiva často reagují se zásaditými oxidy legovaných ocelí, proto díky vznikajícím chemickým reakcím, vznikají též povrchové vady odlitků - připečeniny a zapečeniny. Díky těmto vadám se neodlévají například manganové oceli do křemenných písků. U tenkostěnných odlitků se izolují rozdílné oxidy zásaditým či neutrálním nátěrem, u silnostěnných odlitků se naopak použije formovací směsi s ostřivem, které obsahuje ve vázané formě  $\text{SiO}_2$  (Olivín).

Podle původu vzniku se ostřiva dělí na přirozená a umělá. Mezi přirozená ostřiva patří zejména křemenné písky a umělá představuje především šamotový lupek [1].

Volba druhu ostřiva pro přípravu směsí závisí na následujících kritériích:

- a) chemická povaha odlévané slitiny (druh leg. materiálu);
- b) druh odlévaného kovu, lící teplota, přípustný obsah živců v písku;
- c) tvarová složitost a tloušťky stěn odlitku (náchylnost ke vzniku vad odlitků - zapečeniny, zálupy);
- d) druh pojiva;
- e) ekonomická dostupnost a cena směsi i s ohledem na získání max. pevnosti s min. obsahem pojiva.

Po uvážení všech kritérií vychází, že nejpoužívanějšími ostřivy jsou křemenné písky. Křemen je nejrozšířenější materiál, levný, protože se nachází v přírodě v přiměřeně zrnitém stavu. Díky jeho vlastnostem, které jsou výborné i za vysokých teplot, vyhovuje běžným potřebám [2].

### 2.1.1. Křemenná ostřiva

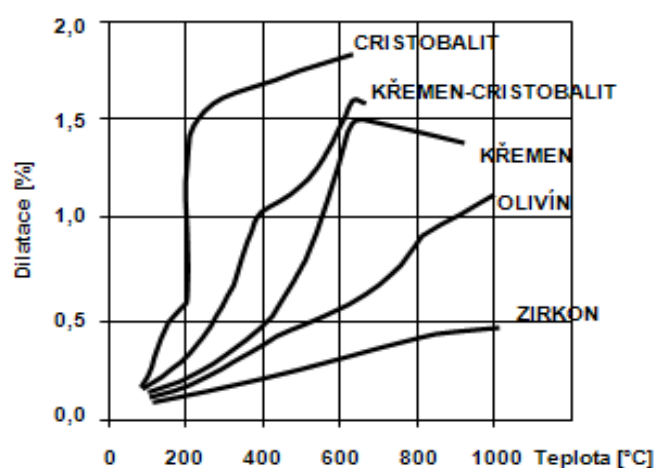
Křemenná ostřiva patří mezi nejrozšířenější a jsou známá také pod názvem křemenné písky. Základem ostřiva je křemen  $\text{SiO}_2$ , který krystalizuje v trigonálně trapezodrické soustavě, tvrdost má 7 a jeho měrná hmotnost se pohybuje mezi 2620 až 2660  $[\text{kg.m}^{-3}]$ . Na křemenné ostřivo jsou kladeny velké požadavky zejména z hlediska chemické čistoty, tvaru zrn a granulometrické skladby. Dle tvaru zrna patří mezi ideální tvar koule, neboť koule je geometrický tvar, který má při maximálním objemu minimální povrch. Tvar koule je ideální především z hlediska úspory pojiva a vytvoření optimální vrstvy na povrchu ostřiva. Tento tvar je především vhodný pro výrobu jader. Pokud je brána v úvahu i náchylnost ostřiva ke vzniku zálupů, je nejvhodnější ostřivo ostrohranné. Základní požadavky na křemenné písky jsou:

- a) vysoká mineralogická čistota ( $\text{SiO}_2 > 96 [\%]$ );
- b) tvar (hranatost x kulatost zrn, použití na jádra či formu);
- c) minimální koncentrace jemných podílů;
- d) minimální až nulová obsazenost hrubších zrn nad 0,5 – 0,6 [mm] (neplatí u masivních odlitků);
- e) nízká koncentrace živců;
- f) velikost středního zrna  $d_{50} =$  cca 0,14 - 0,32 [mm], každá slévárna pracuje s jinou velikostí středního zrna;
- g) povrch zrn vysoce aktivní, čistý, bez povlaků a nalepených částic [1].

#### 2.1.1.1. Nevýhody křemenného ostřiva

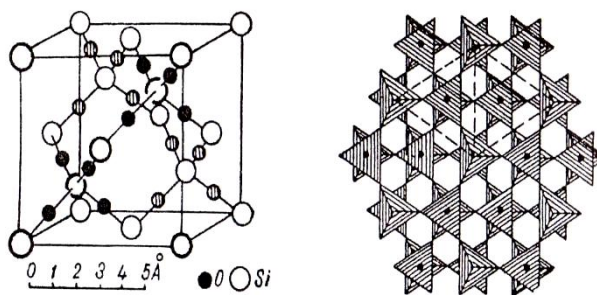
**1. Zvýšená reaktivnost křemenných ostřiv** za vyšších teplot s oxidy železa a jiných kovů je příčinou snížení žáruvzdornosti formy. Reakcí  $\text{SiO}_2$  s  $\text{FeO}$  vzniká fayalit za teplot 1185 až 1205  $[\text{°C}]$ , který je doprovázen růstem o 15,7 [objemových %]. Díky fayalitu spolu s penetrací kovu ve slévárenských formách vznikají zapečeniny. Dále díky neustále se snižující se teplotě tání při odlévání legovaných ocelí a hmotných ocelových odlitků se používají ostřiva zásaditá, které se vyznačují vysokou žáruvzdorností.

**2. Neplynulá tepelná dilatace** je pro slévárenské účely velmi nevýhodná. Tepelná dilatace křemene je na rozdíl od ostatních ostřiv dosti vysoká, což je patrné z obr.2-1. Neplynulost dilatační křivky je způsobena zejména modifikačními změnami. Dilatace každého zrna ostřiva se sčítají a projeví se makrodilatací formy či jádra. Vady odlitků, jako jsou zálupy, výronky, zadrobenky, je způsobena právě zvýšeným tepelným napětím lícni části formy a snížením mechanických vlastností v kondenzační zóně formy.



Obr. 2-1: Tepelná dilatace některých druhů slévárenských ostřiv [2]

**3. Cristobalitická expanze** je pozvolná přeměna  $\alpha$ - křemene v  $\alpha$ - cristobalit při teplotách 900 až 1000 [°C]. Při této přeměně zároveň dochází k přeměně hexagonální krystalické mřížky na mřížku krychlovou. Tato přeměna je za normálních podmínek nevratná a její rychlost závisí na přítomnosti katalyzátorů a na slohu křemene. Naopak v nerovnovážných podmínkách slévárenské formy je přeměna v  $\alpha$ - cristobalit ovlivněna přítomností minerálů ( $\text{Na}^+$  z vodního skla,  $\text{K}^+$  z resolů), které celou přeměnu urychlují, ale i přítomností oxidů  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které naopak přeměnu brzdí. Proto má na cristobalitickou přeměnu vliv i velikost zrn křemene. U malých zrn se lze setkat s rychlou přeměnou. U hrubších probíhá přeměna ve dvou fázích. V první fázi vznikají zárodky cristobalitu na povrchu zrn, ve fázi druhé vzniká cristobalitizace uvnitř zrn [2].



Obr. 2-2: Struktura  $\alpha$ -cristobalit [2]

Obecně platí, že čím vyšší je tepelné namáhání forem (především jader) vyrobených z čistých křemenných ostřiv, tím dochází ke značné cristobalitické expanzi a tím se zároveň nemůže zaručit rozměrová a tvarová přesnost odlitků. U jader s nižším tepelným namáháním, kde dochází k vysoké cyklické rychlosti natuhávání kovu, se cristobalitická expanze projevuje růstem zbytkového napětí. Tato nevhodná expanze se dá zmírnit přidáním bauxitu, oxidů železa či jílu, protože právě tyto prvky zvyšují teplotu cristobalitické expanze na teplotu vyšší, než je teplota formy nebo jádra.

**4. Silikosa** je vážné plicní onemocnění, kterému je vystaveno mnoho slévačů, a to i přes stále se zpříšňující normy hygieny a bezpečnosti práce, jde tedy o nemoc z povolání. Tato plicní choroba vzniká ze zaprášení plic křemenným prachem s velikostí částic 0,0002 až 0,003 [mm]. Tyto částice nelze nijak z plic odstranit. Vzhledem k tomu, že je do dnešní doby silikosa nevyléčitelná nemoc, je velmi nutná prevence, jako jsou v první řadě ochranné pomůcky.

#### 2.1.1.2. Druhy křemenných písků

Tato země má velmi bohaté zásoby vysoce jakostních písků. Těží se především ve třech oblastech: křídové stáří (česká křídová tabule), moravská křídová tabule, písky váté a kaolinové.

Křemenné písky české křídové tabule jsou známé pod názvem Provoďín T2S, Střeleč T2S, Střeleč KM, Srní. Jsou málo znečištěné jílovými minerály s malým procentem vyplavitelných podílů (pod 0,5 [%]), jsou mineralogicky i



chemicky velmi čisté. Mají obvykle pod 0,05 [%]  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , který je vázán převážně na těžké minerály (s hustotou nad  $2830 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ ), kterých mají méně než 0,8 [%]. Zrna se vyznačují středním stupněm zaoblení hran. Písky jsou prakticky bez živců a hodí se proto na formovací směsi pro ocelové odlity.

Křemenné písky moravské křídové tabule z Dolní Lhoty a Boskovic jsou ve srovnání s písky ze Střelče a Provodína méně čisté. Mají vyšší koncentraci  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,07 až 0,16 [%]). Písky jsou použitelné i pro ocelové odlitky.

Písek ze Svitavy naopak díky živcům, kterých je zhruba 3,5 [%] v podobě rozložených zrn, není vhodný pro slévárny ocelí.

Váté písky z oblasti moravsko-slovenského pomezí se vyznačují vysokou kulatostí zrn, která je zapříčiněna obrušováním a erozí, neboť to jsou tropické pouštní písky, nebo písky pobřežních dun mírného pásma.

Písky z okolí Šajdíkového Humence ŠH (Š22 ŠH, Š27 OTŠH, Š35 ŠH, Š50 ŠH) jsou vysoce kulaté s min. obsahem vyplavitelných látek. Hlavní složkou podílů pod 0,063 [mm] je křemen vedle kaolinitu. Zrna jsou velmi pravidelná a hladká. Obsah  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  je vázán převážně na minerály (0,09 [%]  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Vzhledem k vysokému obsahu živců 8 až 10 [%] se nehodí pro slévárny oceli.

Písek ze Strážnice má ve srovnání s pískem ŠH vyšší odplavitelnost a je méně chemicky čistý.

Dále existují řady odpadních písků po plavení kaolinu, například z Hluban či Kaznějova. Tyto písky se vyznačují zejména nízkými pevnostmi ve spojení s organickými pojivy a dalšími nevýhodami. Písky jsou vhodné především pro skořepinové a furanové směsi [2].

## 2.1.2. Nekřemenná ostřiva

Šamot je vypálený žáruvzdorný jíl s obsahem nejméně 30 [%]  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , patří mezi ostřiva neutrální. Další složka šamotové hmoty je  $\text{SiO}_2$ . Další oxidy jsou znečišťujícími příměsemi, jejichž množství a složení závisí na čistotě výchozí suroviny. Při změně poměru  $\text{SiO}_2$  k  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dochází ke změnám fázového složení, což předurčuje žáruvzdorné vlastnosti této hmoty. Teplota tání šamotu je  $1700 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Toto ostřivo neprodělává žádné překrystalizační přeměny, proto je vhodné pro ocelové odlitky.

Olivín je materiál sopečného původu a skládá se z  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  a  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ . Nejčastěji se dá nalézt v zemích USA, Japonsku a Norsku. Olivín má zelenou barvu, hustotu cca  $3200 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ , tvrdost 7 a jeho teplota tání je  $1870 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Na rozdíl od křemenného ostříva se vyznačuje velkou plynatostí, což způsobuje značný problém, naopak plynulá dilatace je oproti křemenu nižší.

Korund v přírodě je minerál safír a korund, znečištěné druhy jsou známe pod názvem Smirek. Ve slévárenství se používá uměle vyrobený, známý pod názvem elektrokorund  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Obsahuje 52,91 [%] Al, jeho bod tavení je  $2050 \text{ [}^\circ\text{C]}$ , tvrdost 9 a je polymorfním oxidem. Má celkem čtyři modifikace ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ). Z nichž  $\beta$  a  $\delta$  - modifikace nejsou zcela potvrzeny a některé literatury je neuvádějí.  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  krystalizuje v šesterečné soustavě a patří k vysokoteplotním modifikacím  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které vznikají z  $\gamma$  -modifikací nad teplotou  $1000 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Je nerozpustný v kyselinách a vyznačuje se hustotou cca  $4000 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ .  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  krystalizuje v krychlové soustavě a vzniká ohřevem hydroxidu kolem teploty  $1000 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Při vyšších teplotách přechází v  $\alpha$ -modifikaci. Jeho hustota je  $3647 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$  a v kyselinách je lehce rozpustný. Nejpoužívanějším ostřivem je elektrokorund ( $\gamma$ -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), který se využívá jako ostřívo pro přípravu jílových směsí, směsí s vodním sklem i s organickými pojivy pro speciální účely.

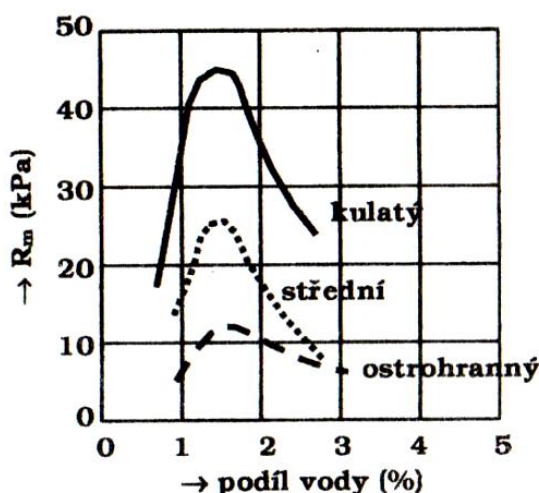
Chromit představuje tuhý roztok  $\text{FeO.Cr}_2\text{O}_3$ , pro metalurgické účely s minimálně 45 – 48 [%]  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  a maximálně 12 [%] Fe. Hustota chromitu je  $4650 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ , tvrdost 5,5 a teplotu tavení je kolem  $2180 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Jako ostřívo má vysokou odolnost proti zapékání odlitků, proto se nejvíc využije u odlévání manganových ocelí v kombinaci s fenolickými a furanovými pojivy.

Zirkon jako ostřívo je tvořen směsí silikátů zirkonu a oxidu zirkonu  $\text{ZrO}_2.\text{SiO}_2$  a  $\text{ZrO}_2$ . Jeho hustota je  $4600 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ , tvrdost 7,5 a teplota tání  $2550 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Ostřívo je vhodné ve spojení se všemi pojivy, ale díky jeho vysoké ceně se používá zejména pro speciální formovací směsi či výrobu keramických břeček.

Magnezit je uměle vytvořené ostřívo a používá se pro odlévání legovaných ocelí. Chrommagnezit obsahuje 40 [%]  $\text{MgO}$  a maximálně 35 [%]  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , snáší teploty nad  $2000 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Oproti němu magnezitchrom, který obsahuje 60 [%]  $\text{MgO}$  a 20 [%]  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , je odolný vůči náhlým změnám teplot. Tyto zásaditá „magnezitová“

ostřiva nejsou pojitelná s furanovými pryskyřicemi, ale s vodním sklem. Proto tyto CT směsi se ve slévárnách nejvíce uplatňují.

V dnešní době existují i další speciální ostřiva, na trhu jsou ostřiva kovová, grafitová či keramická. Kovové ostřivo se uplatňuje ve spojení s formováním v magnetickém poli a společně s ostřivy grafitovými se vyznačují vyšší tepelnou vodivostí. Grafitová ostřiva se vyznačují vysokou korozní a chemickou stálostí, ale proti kovovým ostřivům jsou vůči taveninám nesmáčivá. Keramické ostřivo se vyznačuje vysokou žáruvzdorností a je pojitelné s bentonitem, vodním sklem i s pryskyřicemi. V českých slévárnách se nepoužívá, uplatnění má zejména v Japonsku [1].



Obr. 2-3: Vliv tvaru ostřiva na mechanické vlastnosti formovací směsi [1]

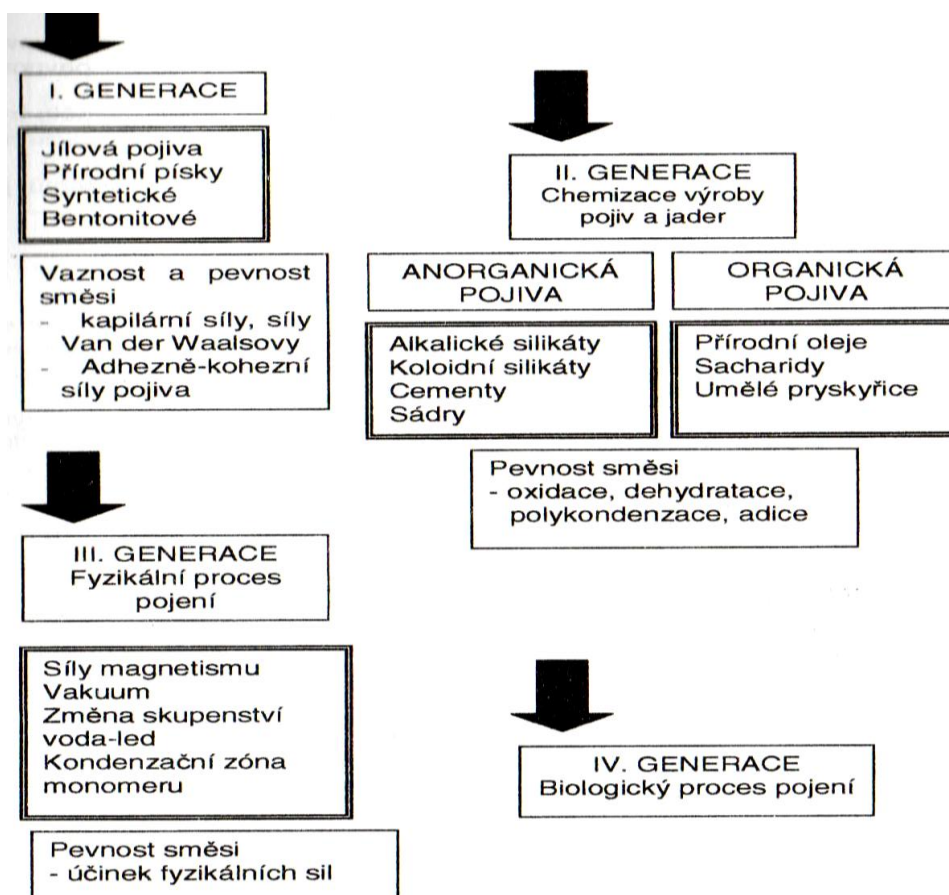
## 2.2. Pojiva formovacích směsí

Pojiva formovacích a jádrových směsí spojují navzájem zrna ostřiva tak, aby zaformované útvary byly schopné manipulace s odléváním. Spojením pojiva s ostřivem vzniká pevnost formovací či jádrové směsi – vaznost za syrova, pevnost po vysušení a vytvrzení, pevnost za vysokých teplot i zbytková pevnost směsi (rozpadavost po odlití). Předpokladem správné funkce jsou tyto vlastnosti pojiv:

- na počátku působení mají být tekutá, aby se mohla rozmístit na površích a v pórech zrnitého systému;
- musí smáčet povrch pojeného materiálu a vytvářet tak adhezní spoje;
- po vhodné době se musí pojivo samovolně zpevnit;

d) adhezní spoje mají zůstat pevné i po ztuhnutí pojiva [3].

V dnešní době lze pojiva rozdělit do čtyř generací. Pojiva I. generace – ostřívo a jílové pojivo se spojí mechanickým způsobem, tzn. přechováním, střešáním či lisováním. Pojiva II. generace – ostřívo s pojivem se spojí v důsledku chemické reakce. Pokud se ostřívo spojí s vodou, nebo má ostřívo magnetický charakter a nemusí se spojovat s pojivem, jedná se o pojiva III. generace. Pojiva IV. generace nejsou k dnešnímu dni v takové fázi a formě, aby je bylo možné využívat. Jedná se o spojení ostříva s pojivem, které by mělo být na bázi živých organismů. Možná v budoucnosti se objeví pojiva, která se budou co nejvíce blížit složení lidského těla a budou využívat biologické procesy pojení, bohužel v dnešní době ještě tyto představy pojiva nesplňují. Podrobný přehled slévárenských pojivových systémů je uveden v obr. 2.4.



Obr. 2-4: Stručný přehled vývoje pojiv formovacích směsí [1]

### 2.2.1. Pojiva I. generace

Pojiva I. generace se řadí mezi pojiva jílová, kde pojení je výsledkem sil kapilárního tlaku a Van der Waalsových sil. Mezi částicí ostřiva a pojivem působí adhezní síly a mezi částicemi pojiva působí síly kohezní. Jílová pojiva se dělí do tří druhů:

1. Kaolinitické jíly jsou pojiva se šamotovým lupkem a tvoří formovací směs určenou pro výrobu forem a jader pro odlévání ocelových odlitků. Jedná se o směs na sušení, která se suší při teplotě 650 [°C]. Kaolinitický jíl se vyznačuje především vynikající žáruvzdorností, ale bohužel i malou bobtnavostí.
2. Illitické jíly se díky své dobré žáruvzdornosti i bobtnavosti nejčastěji používají pro odlévání těžkých litinových odlitků. Nejdůležitějším illitickým jílem je glaukonit.
3. Montmorillonitické jíly se využívají pro směsi na syrovo a nejvíce se uplatňují při strojním formování na automatických formovacích linkách. Pokud je montmorillonitu 70 až 80 [%], pak se tato směs nazývá „bentonit“, který slouží k výrobě bentonitových směsí. Tyto směsi se zejména vyznačují výbornou pojivovou schopností.

Je velmi důležité, aby ve směsi byl dostatek pojiva díky natrifikaci jílu. To se pak do bentonitu přidávají ionty sodíku. Dále je důležitý pojivový systém voda – jíl, který z chemického hlediska představuje „solí“, které jsou tvořeny micelou (jádem s obalovou sférou) [1].

### 2.2.2. Pojiva II. Generace

Pojiva II. Generace jsou založena na chemické podstatě pojení za tepla či za studena. Pojiva se dělí do dvou druhů, na pojiva organická a pojiva anorganická.

### 2.2.2.1. Organická pojiva

Mezi organická pojiva se řadí přírodní oleje, umělé pryskyřice a sacharidy. Pojiva mají uplatnění v oblasti výroby jádrových směsí a umožňují progresivní metody výroby jader. Směsi se vyznačují především vysokou pevností po vytvrzení v ohybu, nízkou teplotou termodestrukce či velmi dobrou rozpadavostí. Směsi mají dále dobrou tekutost, proto se mohou do jaderníku vstřelovat. Pro výrobu je také dobrá delší doba rozpadavosti. Mezi nevýhody se řadí zejména vysokou plynotvornost.

**1. Olejová pojiva:** Získávají se z mastných kyselin, ve vodě jsou nerozpustné a používají se jen ty, které mají schopnost tuhnout oxidací za vzniku pryskyřitých látek. Při teplotách 230 až 250 [°C] dochází k vytvrzení ostřiva s pojivem [1].

**2. Sacharidy:** Jsou nazývány také jako hydrofilní pojiva, protože jsou vodou ředitelná, někdy v ní i částečně rozpustná. K zpevnění dochází především fyzikálně – odpařením vody. Sacharidy výrazně zvyšují vaznost písků za syrova. V dnešní době se tyto pojiva používají jen zřídka, využití mají především při výrobě jader. Ve slévárenství se používají zejména ty sacharidy, které vznikají na základě odpadních produktů (melasa, dextrin, glukopren, škrob..).

#### Škrob:

Škroby jsou makromolekuly tvořené glukosou. Podle surovin, ze kterých jsou škroby vyrobené, se rozlišuje škrob bramborový, kukuřičný, pšeničný, rýžový a další. Pro použití ve slévárenství za účelem zlepšení vlastností jako je například bobtnavost, se škroby částečně chemicky upravují – hydrolyzují se, esterifikují [4]. Škrobový maz se používá ve slévárenství jako pojivo jen zřídka, více se používá jako přísada do syntetických bentonitových směsí (i ve formě dextrinu) pro snížení spěchovatelnosti a zlepšení plastičnosti a houževnatosti směsi [5].

#### Dextrovin:

Dextrovin je škrobový hydrolyzát, který je změkčený dusičnanem sodným. Jedná se o sirupovitý roztok, jeho pH je 6,0 až 7,5, má nažloutlou barvu a je rozpustný ve

vodě. Používá se nejčastěji pro výrobu lepidel, pojiv, či jako aditivum pro potraviny a krmné směsi [1].

#### Kolagen:

Pojmem želatina je označován denaturovaný kolagen a vyskytuje se u mnohobuněčných organismů. Jako extracelulární protein je uspořádán do nerozpustných vláken, která jsou hlavní součástí pojivových tkání. Kolagen jako finální produkt je bílý či bledě žlutý prášek nebo granulát, je rozpustný ve vodě, glycerolu, nerozpustný v etanolu a v acetonu.

#### Glukopren:

Glukopren se získává hydrolýzou škrobových látek za zvýšeného tlaku a teploty v autoklávu. Převládající složkou je glukóza a maltóza. Pojivo je citlivé k teplotě sušení, jádra po vysušení jsou navlhavá. Používá se pro výrobu jader vstřelováním, pro metodu HB i na sušení. Lze ho použít i jako náhradu za dextrin do bentonitových směsí [1].

#### Melasa:

Je matečný louh z výroby glukózy, jejíž obsahem je 50 [%] sacharózy v sušině a 80 [%] sušiny. Melasa se používá jako samostatné jádrové pojivo, pouze ale ve výjimečných případech, protože má spíše více výhod než nevýhod. Mezi ně patří kvašení při dlouhém skladování, je citlivá k teplotě sušení a vysušená jádra jsou značně navlhavá.

**3. Pryskyřice:** Jsou látky ve vodě nerozpustné a nenavlhavé. Při vytvrzení pryskyřice obalí zrna ostřiva a vytvoří se kompaktní tepelně nevratná hmota. Dle druhu pryskyřice a účelu jejího využití se rozlišují technologické vlastnosti směsí s pryskyřicovými pojivy. Mezi nejpoužívanější druhy se řadí pryskyřice fenolické, alkydové, polyuretanové, akrylátové a močovinové. Pryskyřice syntetického původu mají toxické účinky na lidský organismus. Tyto účinky způsobuje právě vývin volného fenolu, formaldehydu nebo furanu během přípravy a vytvrzování směsi. Vzhledem k tomu, že látky působí nepříznivě na centrální nervovou soustavu, je vývoj a zacházení s těmito pojivy pod přísnými předpisy, je přísně



dodržována přípustná koncentrace škodlivin v ovzduší a pracoviště musí být dobře větráno [1].

#### Fenolformaldehydové pryskyřice:

Fenolové pryskyřice jsou výsledkem reakcí mezi fenolem a aldehydy, většinou formaldehydem, na vyšší molekulární produkty. Polykondenzáty z fenolů a aldehydů, obzvláště z fenolů a formaldehydu vznikají tak, že molekuly vodíků fenolů reagují s formaldehydem na fenolové hydroxylové skupiny a přitom se trojrozměrně zesítují. Fenolformaldehydové pryskyřice se dle výroby a použití rozdělují na:

- a) fenolformaldehydové nebo kresolformaldehydové vodní roztoky;
- b) práškové fenolformaldehydové tmely (novolaky).

Základ pryskyřice se modifikuje polyamidy, stabilizátory, sacharidy a prostředky proti osychání. Tekutá fenolická pojiva se vytvrzují při teplotách 190 až 200 [°C] nebo použitím silných katalyzátorů kyselé povahy za studena. Práškové fenolické tmely se uplatňují při výrobě skořepinových forem a jader. Směsi pro skořepinové formování se vyrábějí obalovým způsobem.

#### Močovino-formaldehydové pryskyřice:

Močovino-formaldehydové pryskyřice jsou tvrditelné látky, které vznikají zahříváním močoviny s formaldehydem. Formaldehyd je bezbarvý, štiplavě páchnoucí plyn a močovina je bezbarvá krystalická sloučenina dobře rozpustná ve vodě s mírně zásaditými vlastnostmi, která se vyrábí zahříváním oxidu uhličitého a amoniaku pod tlakem. Ve slévárenství se používají pryskyřice termoreaktivní karbamidové. Ty se vyskytují ve formě vodního roztoku a pro lepší vlastnosti jako je stabilita či vodovzdornost se modifikují různými látkami.

#### Furanové pryskyřice:

Furanové pryskyřice jsou kondenzáty z furfurylalkoholu a formaldehydu. Furanové pryskyřice slouží jako směsné pojivo pro výrobu jader a forem za studena. Pro





vytvrzení směsi s furanovými pojivy se používají vytvrzující přísady na bázi kyseliny sírové nebo aromatických sulfonových kyselin ve spojení s močovinou [6].

#### 2.2.2.2. Anorganická pojiva

Mezi anorganická pojiva se řadí vodní sklo, sádra, cement a další koloidní silikáty.

##### Cement:

Cement jako hydratační pojivo patří k těm nejstarším. Jeho hydratace probíhá po celém objemu, vznikají nové krystalické fáze z přesyceného roztoku a srůstají v kompaktní celek. Vodní součinitel je 0,6 až 0,9. V současné době se používají cementové směsi, které se vytvrzují více než 48 hodin. Na trhu se lze setkat s rychlotuhnoucími cementy, které obsahují speciální portlandský nebo hlinitanový cement a další látky, jejichž doba vytvrzení je více než 6 hodin. Při výrobě cementových forem a jader je důležité, aby cement vázal veškerou vodu. Směsi pak používají pro těžké odlitky z litiny a oceli. Mezi hlavní výhody cementových směsí je jejich tuhnutí na vzduchu bez složitého sušení forem a jader. V současné době se však tyto směsi moc nevyužívají.

##### Sádra:

Sádrové formovací směsi se používají na výrobu sádrových forem pro výrobu přesných odlitků. Sádra má funkci jak ostřiva, tak i pojiva a míchá se s určitým množstvím vody, ze kterého se získá sádrová břečka, ta po určité době ztuhne. Sádrová forma je málo prodyšná, proto se musí sušit při teplotách 200 [°C] a žíhat na 450 [°C]. V dnešní době se používají takzvané napěněné sádrové formy, které díky bublinkách, které se v nich vytváří, přispívají ke zvýšení prodyšnosti formy [1].

##### Vodní sklo:

Po bentonitu je vodní sklo nejdůležitějším anorganickým pojivem, jedná se o vodný roztok křemičitanu sodného získaný jeho rozpuštěním za tlaku párou v autoklávu, který se dále dle potřeby upravuje louhem sodným a zahušťuje se.

Pro slévače je nejdůležitější znát jeho hustotu a molární poměr  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ , takzvaný modul. V dnešní době se využívají dva typy vodního skla:

- a) vodní sklo sodné, upravené, s hustotou  $1,345 \text{ [kg.dm}^{-3}\text{]}$ , modul 3,5;
- b) vodní sklo sodné zahuštěné, hustota  $1,510 \text{ [kg.dm}^{-3}\text{]}$ , modul 2,5.

Vodní sklo se používá jako pojivo ve třech obměnách, které se liší způsobem zpevnění směsí:

1. Zpevnění se dosáhne dehydratací vodního skla vysušením forem a jader nebo jejich oschnutím na vzduchu. Vzhledem k jejich nevaznosti se přidává pro zlepšení vaznosti jílu.
2. Zpevnění se docílí za pomoci přísady, která způsobuje pozvolný rozklad za vzniku gelovitého hydrátu kysličníku křemičitého, viz reakce:



Tuhnutí způsobuje dehydratace vodního skla vstupem vody do reakce a zároveň odpaření vody účinkem tepla s exotermickou reakcí. Ukázalo se, že vytvrzení vodního skla nemá být úplné, aby jeho rozložená část zvýšila pevnost směsi po oschnutí. Příklady složení vhodných strusek jsou směsi v tabulce 2.1., u kterých je ke ztužení využito pozvolného, neúplného rozkladu vodního skla.

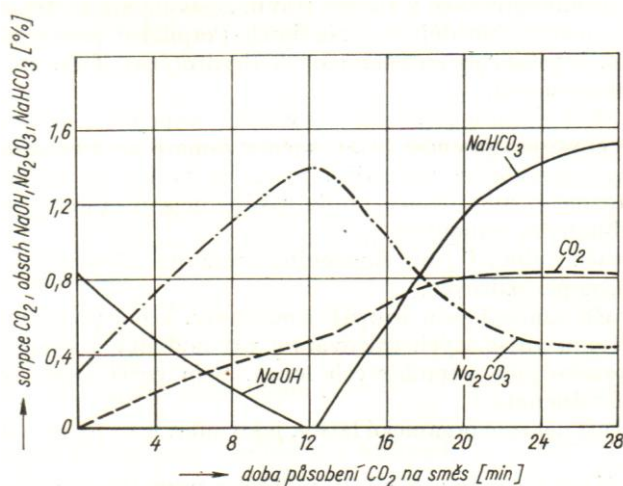
Tab.2.1.: Příklady vhodného chemického složení strusek pro samovolně tvrdnoucí směsi s vodním sklem [16]

Struska FeCr vzorek	$\text{SiO}_2$ [%]	CaO [%]	MgO [%]	$\text{Al}_2\text{O}_3$ [%]	FeO [%]
1	27,9	47,6	12,4	6,7	1,0
2	27,8	51,6	10,6	7,4	0,3
3	24,1	47,5	12,6	4,3	0,9

3. Vodní sklo se rozloží velmi rychle kyselinou, ve slévárnách se často používá kysličník uhličitý. Podle Berga a Ivanova probíhá tvrzení ve dvou obdobích. V prvním období se snižuje obsah hydroxidu solného k nule a zároveň obsah

uhličitanu sodného roste co nejvíce k maximu. To vše je při uvolnění tepla 86 [kJ/mol]. Vzniklá soda zadržuje 10 molekul krystalické vody a může se pyšnit velmi dobrými tmelícími vlastnostmi. V průběhu druhého období se tvoří  $\text{NaHCO}_3$  bez obsahu krystalické vody a tedy i bez tmelících vlastností.

Využití rozkladu vodního skla kyslíčnickem uhličitým pro slévárenské účely navrhl poprvé prof. Petržela [16].



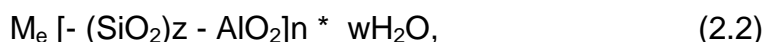
Obr. 2-5: Průběh ztvrdování vodního skla  $\text{CO}_2$  [16]

### 2.2.2.3. Geopolymery

Geopolymery jsou minerální kompozitní materiály netradičního složení, které se velmi podobají anorganickým minerálům – zeolitům. Jsou připravovány polykondenzační reakcí základních hlinito-křemičitanových materiálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Geopolymery vykazují velmi překvapivé vlastnosti, jakými jsou například nerozpustnost ve vodě, nehořlavost, odolnost k teplotám kolem 1000 [°C] a podobně.

Geopolymery mají porézní strukturu a náhodné prostorové uspořádání. Obsahují v pórech a v gelu vodu, která hraje roli jako nosič alkalického aktivátoru. Geopolymery mají trojrozměrnou amorfni mikrostrukturu, v níž jsou silikátové a aluminátové tetraedry vzájemně nepravidelně vázány polykondenzací přes kyslíkový můstek.

Obecný vzorec geopolymérů lze vyjádřit jako:



kde  $n$  označuje stupeň polymerace,  $z$  počet tetraedrických jednotek ( $z = 1, 2, 3$ ),  $M_e$  je alkalický kation, nejčastěji kation alkalických kovů jako sodík, draslík.

V dnešní době jsou známy dva postupy míchání polymerů. U prvního postupu se nejprve smíchají pevné složky směsi, aktivátor se připraví odděleně a následně se směs smíchá a tak se zaktivuje. Druhý způsob přípravy doporučuje míchat směs v pořadí matakaolin, hydroxid, vodní sklo a strusku. Pro správný průběh chemické reakce je však velmi důležitá homogenizace. Chemická reakce probíhá v roztoku při pokojové teplotě. Poté se přidává vodní sklo pro dosažení obsahu alkálií a na konec se přidají ostatní složky, které zlepšují mechanické i zpracovatelské vlastnosti materiálu [7] [8] [9].

### 2.2.3. Pojiva III. Generace

Jsou založeny na fyzikálním účinku pojení s ostřivem, který může být pomocí magnetického pole, zmrazování či vakua.

1. Magnetická metoda pojení vyžaduje jiný typ ostřiva než je ve slévárenství běžně používáno. Zde se využívají jako ostřivo jemné broky z magnetického materiálu. Magnetickou formu opatřenou žáruvzdorným nátěrem se vyrábí zasypáním spalitelného modelu včetně spalitelné vtokové soustavy. Po odlití taveniny, která vypálí model, se vytvoří dutina formy a po ztuhnutí odlitku se zruší magnetické pole, odstraní se broky a odlitek se z rámu vyjme.

2. Vakuové formování je velmi náročné na modelové zařízení, modelová deska a model musí být opatřeny kanály pro vysátí vzduchu.

3. U metody zmrazování lze využít jako pojivový systém s ostřivem, které obsahuje vodu (led). To se dá do rámu na model, který se zaformuje běžným způsobem, následně se forma zmrazí kapalným dusíkem nebo  $CO_2$  [1].

## 2.2.4. Pojiva IV. Generace

V dnešní době nových technologií svět prahne po využití materiálů založených na přírodní bázi, které jsou ekologicky nezávadné. Ve slévárenství probíhá výzkum jádrových pojiv na bázi biopolymerů. Biogenní látky, které tvoří pojiva těchto směsí, jsou látky, které se vyskytují v přírodě. Bílkoviny patří mezi biopolymery a skládají se z aminokyselin spojených vzájemně peptidovou vazbou – CO - NH. Biopolymery jsou přírodní látky s relativní molární hmotností řádově 103 až 106 [g.mol<sup>-1</sup>]. Tyto pojiva jsou ekologickou, ale také ekonomicky výhodnou variantou pojiv k dosud používaným pojivům, ale zatím je jen málo sléváren, které biogenní pojiva používají. V českých slévárnách jsou používána pojiva I. a II. generace.

Výhody biogenních pojiv:

- a) eliminace pachů a toxických plynů při výrobě jader a odlitků;
- b) snadná rozpadavost jader bez použití sekundárního ohřevu;
- c) dobrá recyklace materiálu jader a nepoužité formovací směsi;
- d) srovnatelné pevnostní charakteristiky s běžnými pojivovými systémy;
- e) dostupnost přírodních materiálů [10].

## 2.3. Způsoby výroby jader

Slévárenská jádra, jak je obecně známo, jsou částí forem, které slouží např. k výrobě dutin v odlitku, popř. některých vnějších částí odlitku. Je to v podstatě tvarové tělísko, které je umístěno do příslušného místa dutiny formy a slouží jako překážka, aby do tohoto místa nenatekla tavenina.

Jádra jsou vyráběna formováním:

- a) v jaderníku;
- b) přímo ve formě;
- c) za použití kombinace jaderníků a šablon;
- d) šablonováním;

- e) na přírodní model;
- f) metodou CT;
- g) Croningovou metodou;
- h) metodou ST;
- i) metodou Hot-Box;
- j) metodou Cold-box.

### 2.3.1. Ruční výroba jader v jaderníku

Nejrozšířenější jaderníky jsou jaderníky dvoudílné, což je dvoudílné pouzdro s dutinou, která odpovídá tvarem jádru. Aby obě poloviny jaderníku byly u sebe v téže poloze, je jedna polovina opatřena dvěma vodícími kolíky, druhá má otvory. Sevřený jaderník se postaví jedním koncem na pracovní stůl a do druhého se sype a zároveň upěchovává písek. K vyztužení je nutná výztuha, která se vkládá do částečně zapěchovaného jádra. Současně je nutné vytvořit průduch, který se zhotoví tlustým drátem. Po vytažení drátu se obě poloviny jaderníku rozevrou a jádro se vyjme. Zhotovené jádro se v případě využití za syrova popráší, v případě sušení se potře nátěrem.

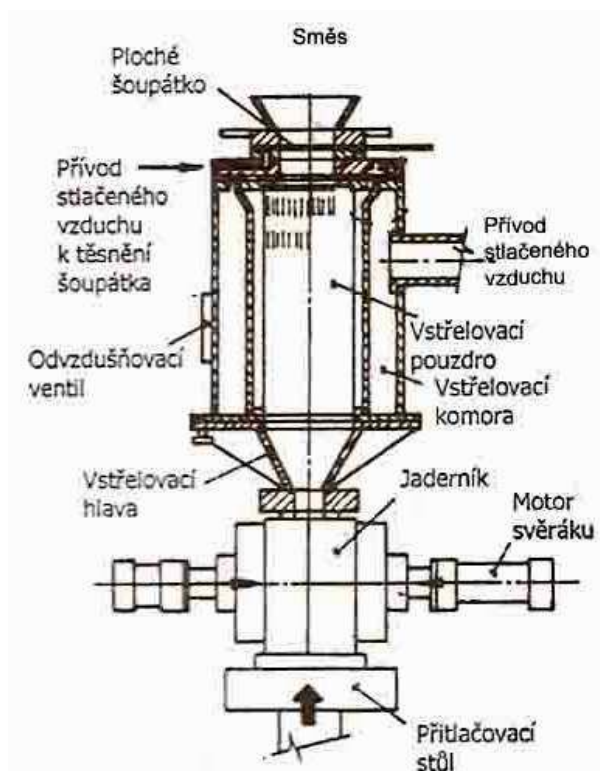
### 2.3.2. Strojní výroba jader v jaderníku

Při sériové výrobě jader se ve slévárenství zpravidla používá formovacích strojů na jádra. Mezi starší způsoby pěchování strojní výroby jader se může začlenit ruční pěchování, pěchování nekonečným šroubem, lisování a střešování. V dnešní době se uplatnily metody foukání a vstřelování jader.

U foukání jader se do zásobníku směsi přivede stlačený vzduch, který se snaží uniknout přes foukací otvor na desce. Při tomto pohybu stlačený vzduch se sebou strhává i jádrovou směs, kterou velkou rychlostí vpravuje do jaderníku, až je celý jaderník plný a upěchovaný.

Vstřelování jader je jedním z nejvýkonnějších způsobů pěchování jader. Jádrová směs je umístěna ve vstřelovací komoře, která je uzavřena vstřelovací deskou s šoupátkem. Přejít z komory do vstřelovacího otvoru je velmi pozvolný. Čím má směs horší tekutost, tím musí být pozvolnější. Stlačený vzduch, kterým se

vstřelí jádro do jaderníku, je shromážděn ve vzdušníku a čeká na otevření vstřelovacího ventilu. Rozdíl mezi vstřelováním a foukáním jader je ten, že u vstřelování stlačený vzduch působí na horní hladinu směsi ve vstřelovací komoře a nárazem ji vytlačí z komory do jaderníku bez toho, aby vznikla pískovzdušná směs[11].

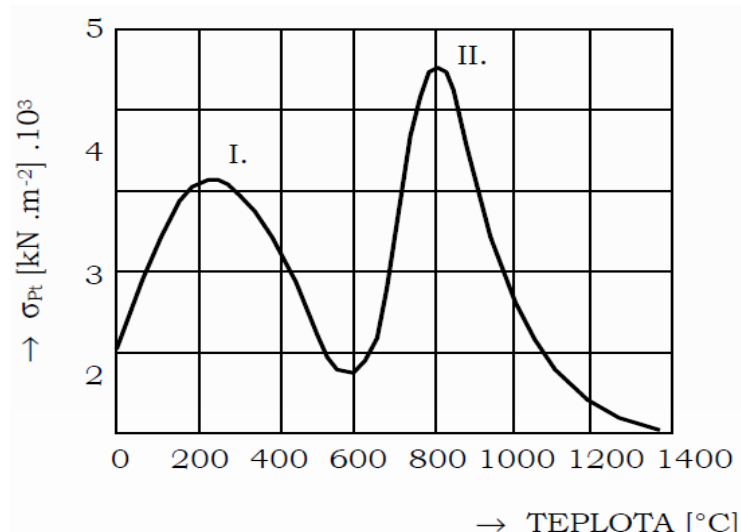


Obr. 2-6: Vstřelovací stroj s vstřelovacím ventilem [12]

### 2.3.3. Výroba jader metodou CT

Křemenné ostřívo s vodním sklem se upěchuje v jaderníku a profoukne oxidem uhličitým. Oxid uhličitý je suchý, kyselý plyn, který vodní sklo vysuší a současně převede do kyselé rosolovité podoby, čímž vzniká gel kyseliny křemičité a soda, která se může při vyšších teplotách rozkládat na nežádoucí plyn  $\text{Na}_2\text{O}$ , který způsobuje naplynění taveniny. Směsi na bázi CT -  $\text{CO}_2$  vykazují špatnou rozpadavost, nízkou pevnost, nižší pevností proti otěru, časově omezenou skladovatelnost (jádra absorbují vlhkost z okolní atmosféry a po několika dnech dochází k rozpadu. Při vkládání jader do formy mohou vznikat v odlitku

zadrogeniny v důsledku otěru při manipulaci s jádry. Složitý tvar jader s tenkými tvary nelze vyrobit [11].



Obr. 2-7: Průběh zbytkové pevnosti CT směsi s vodním sklem v závislosti na teplotě [1]

#### 2.3.4. Výroba jader metodou podle Croninga

Pro tuto metodu byla dříve základem termoplastická fenolformaldehydová pryskyřice, dnes se používá pryskyřice fenolická. U této metody vzniká skořepina postupným natavováním směsi pryskyřice a ostřiva teplem vyhřáté modelové desky nebo jaderníku na teplotu 240 až 280 [°C].

#### 2.3.5. Hot-Box metoda

Pomocí této metody horkých jaderníků (Hot-Box) se vyrábí přesná jádra přímo v kovových horkých jadernících. Vstřelená směs se zde vytvrzuje teplem. Metoda Hot-Box používá vazné směsi, které jsou na bázi pojiv rozpustných ve vodě, směs je vstřelována do jaderníků. Jako pojiv pro metodu HB se používá:

- a) močovino-formaldehydová;
- b) melamino-formaldehydová;
- c) furanová;
- d) fenol-formaldehydová (resoly);
- e) modifikované Na-silikáty a roztoky solí.



Princip této metody spočívá v naplnění jaderníku jádrovou směsí, který je předeřtý na teplotu 200 až 300 [°C]. Po ztvrdnutí povrchové vrstvy jádra se jádro vyjme a k dotvrzení celého průřezu jádra dojde už mimo jaderník akumulovaným teplem [13].

### 2.3.6. Cold–Box metoda

Tato metoda je známá i jako „metoda studených jaderníků“ a byla vynalezena zhruba kolem roku 1967. Princip metody spočívá v tom, že jádro je v nevyhřátém jaderníku upěchováno vstřelením směsi s pryskyřicí bez obalu katalyzátoru. Katalyzátor je zplyňován, a tím profoukává jádro stejným způsobem, jako například CO<sub>2</sub> u metody CT. Po ztvrdnutí jádra, což bývá většinou okamžité, se může jádro vyjmout z jaderníku. U této technologie nezáleží na vlhkosti písku ani ovzduší, protože ředidlem je voda. Důležitou vlastností je termoplasticita před vlastním tepelným vytvrzením pryskyřice, protože snižuje vliv tepelné dilatace ostřiv a brání vzniku trhlin a výronků.

### 2.3.7. Výroba jader metodou ST

Samotvrdnoucí směsi, které používají pojiva II. generace, jsou vhodné zejména pro kusovou či malosériovou výrobu jader středních velikostí. Výroba spočívá v tom, že do jaderníku se vstřelí samotvrdnoucí směs, která se dodatečně upěchuje a nechá se na určitou dobu odstát. Jádrová směs vytvrdne podle druhu katalyzátoru - tvrdidla, časově za cca 30 – 60 [min] [11].

## 2.4. Vlastnosti jádrové formovací směsi

Obecně vlastnosti formovací směsi se rozdělují na:

- a) **fyzikální:** tepelná vodivost, měrné teplo, měrná hmotnost, teplotní vodivost;
- b) **chemické;**
- c) **technologické za syrova:** vaznost, houževnatost, tekutost, formovatelnost, spěchovatelnost, prodyšnost, tvrdost a drobivost;
- d) **technologické po vysušení:** pevnost, otěruvzdornost, navlhavost;
- e) **technologické za vysokých teplot:** pevnost, zhroutivost, plynatost, tepelná roztažnost.

Definice ideální formovací, popř. jádrové směsi je dle prof. Vetišky:

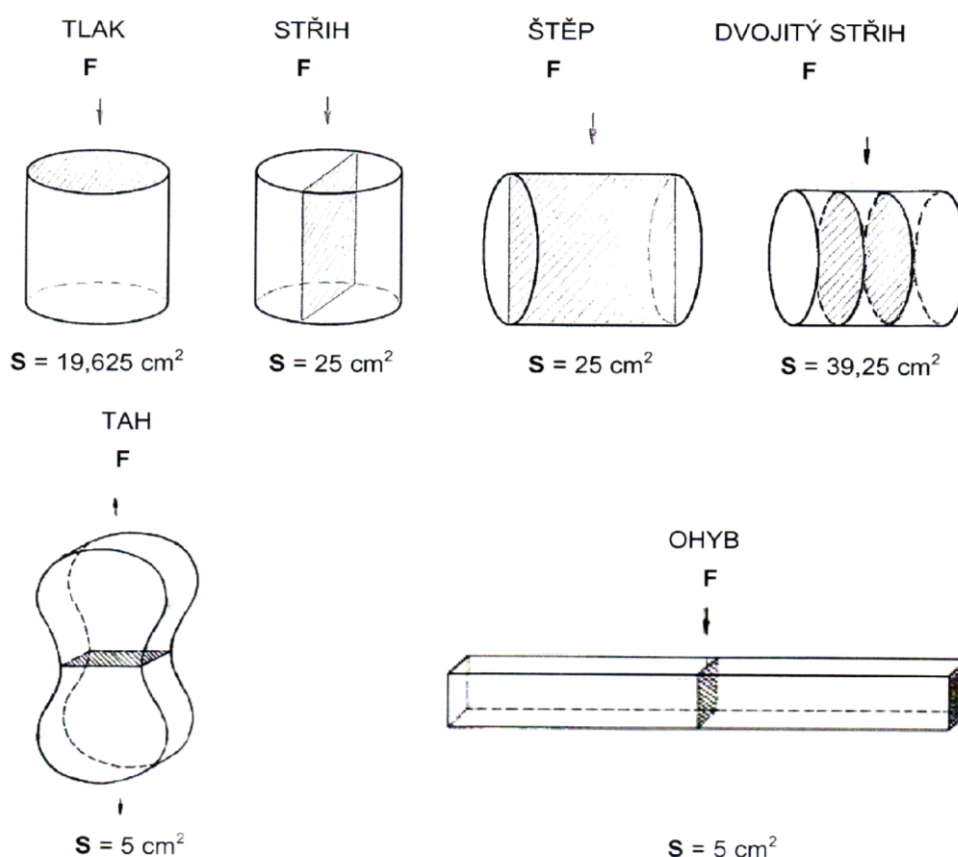
„Ideální formovací směs je levná, dostatečně tekutá nebo plynná látka, která po styku s modelovým zařízením okamžitě ztuhne za normální teploty a vytvoří hladké stěny tenké formy o vysoké pevnosti. Je nesmáčivá a chemicky netečná vůči litému kovu. Má dostatečnou prodyšnost pro unikání plynů a vzduchu z formy při lití. Je pevná a rozměrově neměnná až do ztuhnutí dostatečně tlusté kůry odlitku, pak se rozpadá nebo vypařuje na výchozí stav a je schopna opětovného použití bez nutnosti regenerace.“ konec citace [6].

Tato definice a ani veškeré vlastnosti formovací směsi, které jsou výše uvedeny, nemohou platit u směsí jádrových. U jádrových směsí se lze zajímat o pevnost v tlaku popřípadě stříhu, pevnost v ohybu, prodyšnost a vlhkost.

**Pevnost** je schopnost odolávat mechanickému namáhání, aniž by došlo k plastickému přetvoření. **Prodyšnost** je schopnost směsi propouštět plyny vznikající při odlévání. **Vlhkost** je obsah volné vody odstranitelné sušením.

### 2.4.1. Zkoušky ke zjištění pevnosti směsi

Na pevnost směsi mají obecně vliv faktory jako je obsah pojiva, složení zrna, spěchovatelnost, vlhkost a další faktory spojené s přípravou směsi (teplota, čas). Obvykle se stanovuje 5 základních pevnostních hodnot: pevnost v tlaku, tahu, štěpu, střihu (smyku) a ohybu [14].



Obr. 2-8: Zkušební tělesa [14]

**Pevnost v tlaku** se může provést dvojím způsobem, a to za syrova a po vysušení. Pevnost v tlaku je definována jako zatížení, při kterém dojde k porušení zkušebního tělesa, vztaženo na jednotku plochy tělesa. Zkušební těleso se vloží na kruhové plochy tlakových čelistí přístroje, z nichž se jedna uvede do pohybu a plynule zvyšuje tlak na těleso až do okamžiku porušení. Na stupnici přístroje se pak odečte naměřený tlak.

$$\sigma_{tl} = \frac{F}{S} \text{ [kPa]}, \quad (2.3)$$

kde:  $\sigma_{tl}$  - pevnost v tlaku [kPa];

$F$  - maximální síla, za které dojde k porušení zkušebního tělesa [kN];

$S$  - příčný průřez zkušebního tělesa [m<sup>2</sup>].

**Pevnost ve štěpu** se stanovuje podobně jako pevnost v tlaku, jen je zkušební těleso uzavřeno mezi čelisti přístroje a tlaková síla tak působí kolmo na osu zkušebního tělesa – válečku.

**Pevnost ve stříhu** se provádí na stejném přístroji, jen s půlkruhovými čelistmi, které působí na protilehlé poloviny ploch zkušebního tělesa. Pevnost ve stříhu se provádí ve chvíli, kdy zkušební těleso odolává pevnosti na tlak, překračuje její stupnici. Je také možné využít speciální čelisti pro dvojité stříh.

**Pevnost v tahu a ohybu** se docílí též zatížením na zkušební vzorek. V prvním případě má vzorek tvar osmičky a v případě druhém hranol.

Rozměry zkušebních tělísek pro měření:

- a) pevnosti v tlaku, stříhu (smyku), štěpu a prodyšnosti jde o válcové o válcové těleso s průměrem podstavy 50 [mm] a výšce  $50 \pm 0,3$  [mm];
- b) vaznosti a pevnosti v ohybu je to hranol o čtvercovém průřezu 22,36 x 22,36 [mm] a délce 170 [mm].

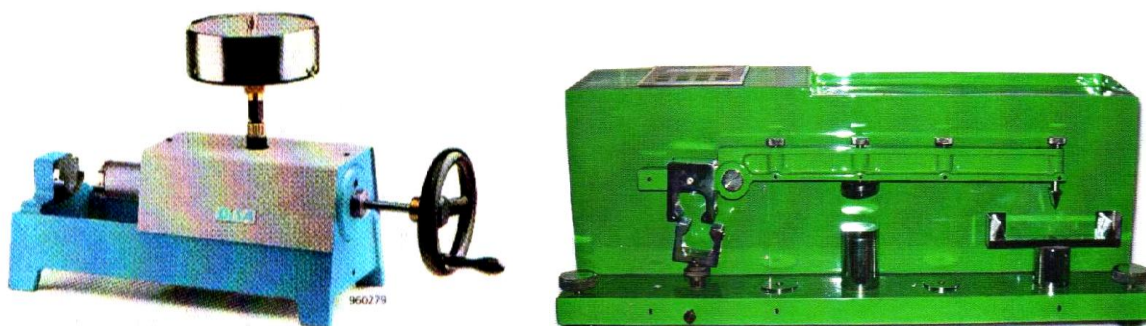
Přístroje na zkoušení pevnosti:

Přístroje jsou určeny k měření pevnosti formovacích a jádrových směsí na zkušebních tělesech ve stavu syrovém, vysušeném nebo vytvrzeném. Umožňují měřit pevnost v tlaku, stříhu, štěpu, dvojitým stříhu, tahu a ohybu.

Fundamentem přístroje a zdrojem síly působící na plochu zkušebního tělesa z pravidla bývá pneumatický, hydraulický nebo mechanický systém. Ten je spojen s mechanismem zajišťujícím nárůst síly a zároveň s indikačním zařízením, které ukazuje naměřenou hodnotu.

Měřenou veličinou je obecně tlak, což je poměr síly  $F$  působící na plochu zkušebního tělesa  $S$ . Předpokladem správné činnosti stroje a správného měření je

plynulý a rovnoměrný nárůst tlaku působící na měřené těleso, těsnost pneumatického nebo hydraulického systému přístroje, správná funkce zařízení a příslušenství. Obsluha může celé měření velmi lehce ovlivnit svým nesprávným manipulováním. Důležité je použití rozměrově správných zkušebních těles a jejich umístění v přístroji, plynulý počátek, rovnoměrné zatěžování tělesa s nárůstem síly a především správné odečtení měřených hodnot [14].



Obr. 2-9: Přístroje na zkoušení pevnosti [14]

#### 2.4.2. Zkouška ke zjištění prodyšnosti směsi

Literatura uvádí prodyšnost jako schopnost spěchované směsi propouštět plyny a páry, která se dá vyjádřit v jednotkách prodyšnosti SI. Prodyšnost se vyjadřuje počtem  $[m^3]$  vzduchu, teplého  $20 [^{\circ}C]$ , který se protlačí za  $1 [s]$  plochou zkoušené směsi  $1 [m^2]$  a délce  $1 [m]$  při přetlaku  $1 [kPa]$ .

Zkušební váleček, který má stejné rozměry jako při zkouškách pevnosti a který se zhotoví stejným způsobem, tj. na pěchovacím přístroji třemi údery beranidla, se ponechá v kovovém pouzdře a umístí na hlavici přístroje na měření prodyšnosti, utěsní se a zapne stroj. Vzorkem prochází pod určitým tlakem proud vzduchu a po ustálení manometru se odečte naměřená prodyšnost na stupnici přístroje [14].



Obr. 2-10: Příklad přístroje na stanovení prodyšnosti Multiserw- Morek [14]

### 2.4.3. Stanovení vlhkosti směsi

Podstatou zjištění vlhkosti ve vzorku je stanovení vysušení vzorku do ustálené hmotnosti a měří se jako procentuální úbytek hmotnosti formovací či jádrové směsi po vysušení. V dnešní době je nejčastěji používána na vysušení infralampa. Doba vysušení se tak velmi zkracuje oproti starším typům sušiček.

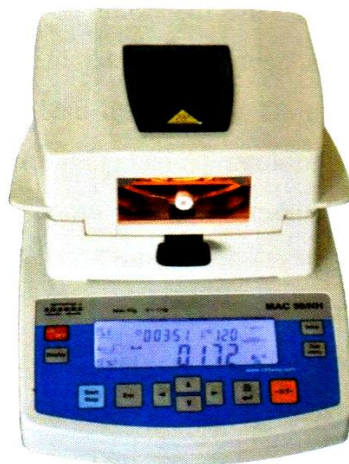
Výpočet vlhkosti v [%] dle vzorce:

$$W_p = \frac{m_v - m_s}{m_v} * 100 \quad [\%] \quad (2.4)$$

kde:  $W_p$  - poměrná (relativní) vlhkost [%];

$m_v$  - hmotnost vlhkého vzorku [g];

$m_s$  - hmotnost vysušeného vzorku [g] [15].



Obr. 2-11: Příklad přístroje na stanovení vlhkosti směsi [14]

## 2.5. Vliv teploty okolí na jednotlivé složky jádrové směsi

V žádné odborné literatuře se neuvádí, že by teplota okolí měla nějaký vliv na jednotlivé složky jádrové směsi. V praxi ale již odborníci zjistili, že určitý podíl na kvalitě jádrové směsi teplota okolí vliv má.

**1. Vliv teploty okolí na pojiva:** Výrobci pojiv v technických a bezpečnostních listech většinou uvádí, že by pojiva neměla být uchovávána v teplotách nižších než 10 [°C]. Ve slévárnách jsou pojiva většinou uložena v barelech v hale, pod širým nebem nikdy nestojí. Z toho vyplývá, že uvnitř slévárny většinou nejsou teploty pod 0 [°C]. Též se z praxe ví, že vzhledem k poměru ostřiva a pojiva (většinou cca 3 až 4 [%] pojiva na hmotnost 200 [kg] ostřiva), nižší teplota pojiva nemá až takový vliv, neboť se v tak malém množství v ostřivu „ztratí“. Pojivo zanedbatelné hmotnosti vůči ostřivu získává či ztrácí svou teplotu od ostřiva při promíchání v mísiči.

**2. Vliv teploty okolí na ostřiva:** Z výše uvedeného vyplývá, že teplota vnějšího okolí by měla mít vliv především na ostřivo. Některé odborné literatury uvádí [2], že pod 10 [°C] se ostřivům zhoršují mechanické vlastnosti, proto je důležité, aby slévárenský písek byl udržován ve vysušených zásobnících na ustálených teplotách. Značný vliv teploty okolí se projevuje například na vlastnosti geopolymerního pojiva. Nízká teplota okolí má negativní vliv na pojící systém ostřivo - geopolymerní pojivo, nedochází ke správné tvorbě pojivových můstků.

V praxi ale ne každá slévárna má v zásobnících řízenou teplotu a vlhkost. Je třeba dokázat a potvrdit teorii, která tvrdí, že čím nižší jsou teploty ostřiva, tím nižší jsou mechanické vlastnosti výsledné směsi. Tímto tématem se dopodrobna ještě nikdo nezabýval.

Lze se z praxe domnívat, i když se tím výzkumy nezabývají a tím pádem není nic potvrzeného, že velký vliv na vlastnosti směsi má i teplota lícího kovu, neboť například šedá litina má dvakrát větší teplotu taveniny, než slitiny hliníku. Tímto tématem se ale tato diplomová práce nezabývá.

### **3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Experimentální část této diplomové práce byla zaměřena na zkoušení mechanických vlastností 2 různých druhů slévárenského písku (resp. ostřiv) při různých teplotách, která byla spojena s organickým, či dvěma anorganickými pojivy, čímž bylo vytvořeno 6 typů jádrových směsí. Jádrové směsi byly vytvrzovány dvojím způsobem, tj. pomocí  $\text{CO}_2$  a samovolně. Z těchto jádrových směsí byla vyrobena standardní zkušební tělíska, která byla podrobena mechanickým zkouškám (stříhem a ohybem). Zkoušky probíhaly v různých časových intervalech. Výsledkem experimentální části bylo zjištění, při jakých teplotách ostřiva se mění mechanické vlastnosti (stříh, ohyb). Zároveň se stanovilo, která směs byla z hlediska konkrétních mechanických vlastností nejvýhodnější pro výrobu jader určených k výrobě odlitků ze slitin hliníku.

#### **3.1. Charakteristika použitých ostřiv**

Pro experiment se použily 2 druhy křemenných písků, které firma Unitherm, s.r.o. využívá pro svou výrobu jader.

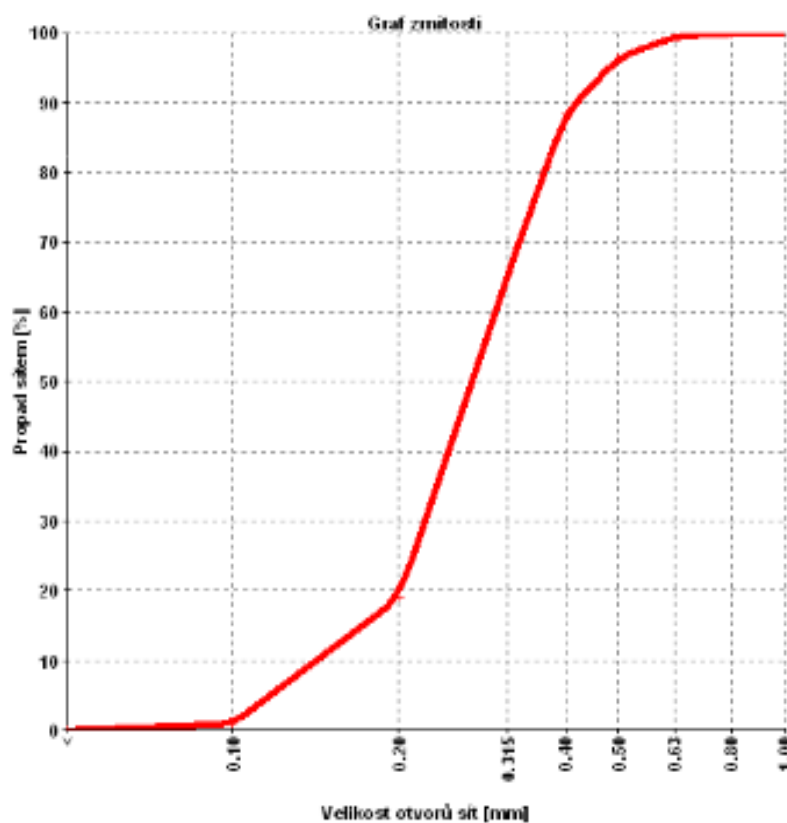
##### **3.1.1. Slévárenský písek ST 53**

Slévárenský písek ST 53 vyrábí firma Sklopísek Střeleč, a.s. Tato firma je výrobcem vysoce kvalitních a čistých sklářských, slévárenských, technických a sportovních písků. Jedná se o písek s vysokým obsahem  $\text{SiO}_2$  a granulometrií vhodnou pro slévárenský průmysl pro lití do pískových forem a výrobu pískových jader. Písek ST 53 má velikost středního zrna  $d_{50}$  0,27 [mm] a zrnitostní rozsah 0,10 – 0,63 [mm], jedná se o písek ostrohranný. Jeho hustota je 2,65 [g/ml], tvrdost 7, pH 8. Bod tání má při 1780 [°C], spékavost při 1560 [°C], vlhkost v mokřem stavu je maximálně 8 [%] a ve stavu vysušeném maximálně 0,2 [%]. Chemická analýza a zrnitostní data jsou uvedeny na obr. 3-1, 3-2, 3-3. [17].



Velikost otvorů sítí [mm]	Obsah frakcí [%]	Propad sítí [%]
1.00	0.00	100.00
0.80	0.00	100.00
0.63	0.50	99.50
0.50	3.00	96.50
0.40	8.00	88.50
0.315	23.00	65.50
0.20	46.50	19.00
0.10	18.00	1.00
<	1.00	0.00

Obr. 3-1: Tabulka síťového rozboru [17]



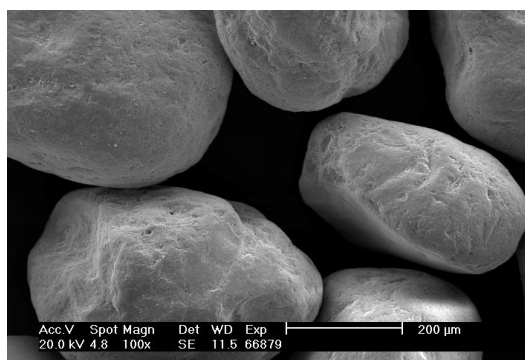
Obr. 3-2: Graf síťového rozboru [17]

D10mm	0.141	SiO <sub>2</sub> %	99.750
D25mm	0.348	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	0.033
D50mm	0.271	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	0.144
D60mm	0.299	TiO <sub>2</sub> %	0.042
D75mm	0.212	CaO%	0.004
D60/D10	2.111	MgO%	0.002
D75/D25mm10-2	60.999	Na <sub>2</sub> O%	0.002
Sth[cm <sup>2</sup> /g]	92.367	K <sub>2</sub> O%	0.010
AFS[cm <sup>2</sup> /g]	52.649		
MK[mm]	0.280		

Obr. 3-3: Chemická analýza a další parametry [17]

### 3.1.2. Slévárenský písek SP 28

Slévárenský písek s obchodním názvem SP 28 dodává firma Sand Team s.r.o. Tento křemenný písek má též vysoký obsah SiO<sub>2</sub>, jako písek ST 53, má vysokou teplotní odolnost a je vhodný pro odlévání všech kovů včetně oceli. Velikost středního zrna d<sub>50</sub> je 0,24 – 0,28 [mm], jedná se o písek, který má kulatá zrna. Chemické a fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.1. [18].



Obr. 3-4: Ukázka tvaru zrna SP 28 [18]

Tab.3.1.: Charakteristické chemické a fyzikální vlastnosti [18]

SiO <sub>2</sub>	98,2 [%]
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15 [%]
Uhličitany	max. 0,15 [%]
vyplavitelné látky	max. 0,20 [%]
Spékavost	min. 1400 [°C]
vlhkost	max. 0,2 [%]
tvarová charakteristika	Wk = 1,10

Tab.3.2.: Charakteristická granulometrická skladba [18]

Síta [mm]	Podíl [ g ]	Součet [%]
1	0	0
0,71	0	0
0,5	0	0
0,355	0,08	0,08
0,25	6,76	6,84
0,18	41,00	47,84
0,125	44,42	92,26
0,09	7,38	99,64
0,063	0,16	99,8
0,02	0	99,8
Výplav	0,20	100
Celkem	100	-



Obr. 3-5: Sítový rozbor ostřiva [18]

## 3.2. Použitá pojiva

Jako pojiva se použily 3 druhy organických i anorganických pojiv, které firma Unitherm, s.r.o. využívá pro svou výrobu. Přesné složení jednotlivých pojiv není známo, neboť žádný výrobce neprozradí své „know - how“. Základní vlastnosti jsou většinou uvedeny v technických či bezpečnostních listech, které výrobce ze zákona přikládá k prodeji svých výrobků. Zvláštní opatření jako

nedopustit styk s kůží, očima a oděvem, používat rukavice, ochranné brýle a ochranný oděv, skladovat v uzavřených obalech za běžných teplot, bez účinků slunečního záření, platí u všech pojiv a přísad, které se používaly v experimentální části diplomové práce.

### 3.2.1. Ecolotec

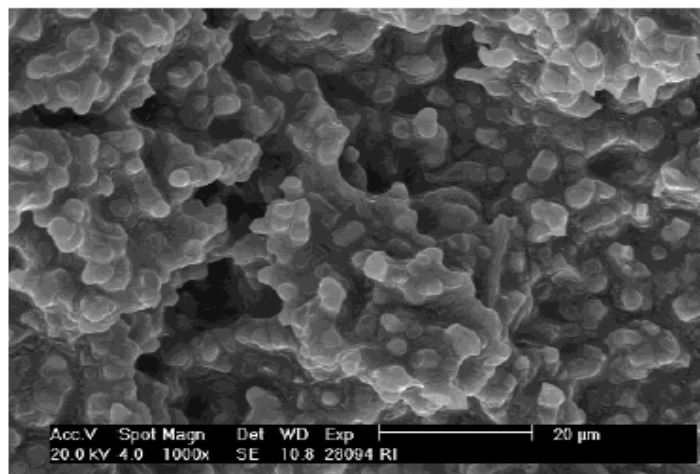
Ecolotec patří mezi organická pojiva, jde o pryskyřici. Skládá se z hydroxidu draselného, fenolu a formaldehydu. Ecolotec 898 je kapalného skupenství, žluté až načervenalé barvy, bez zápachu. Má pH 13, jeho hustota je  $1,33 \text{ [g.cm}^{-3}\text{]}$ . Jeho bod varu je  $100 \text{ [}^\circ\text{C]}$ , bod tání není v bezpečnostních listech uveden. Ecolotec je nehořlavá, nevýbušná, žíravá kapalina. Ecolotec 898 dodala firma FOSECO [19].

### 3.2.2. Desil J

Desil J je anorganické pojivo na bázi alkalických silikátů, jedná se o aditivované vodní sklo s dobrou skladovatelností jader i při vyšší relativní vlhkosti. Jádra mají dobrou rozpadavost v intervalu teplot  $300 \text{ až } 800 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Zlepšuje rozpadavost směsi a regenerovatelnost ostřiva oproti základnímu vodnímu sklu. Desil J je též v kapalné formě, jeho barva je mléčná, zakaleně bílá, bez zápachu. Je silně zásaditý, nehořlavý. Jeho hustota je  $1328 \text{ až } 1557 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ . Při styku dráždí oči a kůži, při práci s ním je povinné mít ochranné pomůcky [20].

### 3.2.3. Geopol 618

Geopol 618 je anorganické geopolymerní pojivo. Toto pojivo obsahuje křemík a hliník, je na bázi polysilikátů. Má nízký stupeň polymerace, která se zvyšuje působením kapalných tvrdidel. Je vhodný pro většinu křemenných i nekřemenných ostřiv. Je to bezbarvá viskózní kapalina o hustotě  $1500 \text{ až } 1520 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ , obsah  $\text{SiO}_2$   $25,5 \text{ až } 27,0 \text{ [%]}$ , obsah  $\text{Na}_2\text{O}$   $14,5 \text{ až } 15,5 \text{ [%]}$ .



Obr. 3-6: Ukázka amorfní struktury pojiva Geopol 618 [21]

Ke Geopolu 618 se pro CT směsi váže Geotek 007, což je akcelerator, neboli přísada do slévarenských směsí vytvrzovaných  $\text{CO}_2$ . Pro směsi samotuhnoucí je naopak zapotřebí jiný přípravek, a to tvrdidlo SA 75. Geopol 618, Geotek 007 i tvrdidlo SA 75 dodala firma SAND TEAM, spol. s r.o. [21].

Geotek 007 je hnědá kapalina vyznačující se hustotou 1,25 až 1,3  $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$ , za normálních podmínek je stabilní. Je nehořlavý a hoření ani nepodporuje [22].

Tvrdidlo pro geopolymerní pojiva SA 75 se pod chemickým názvem nazývá propylencarbonát. Jeho hustota je 1,14 až 1,16  $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$ , je stabilní do 200  $^{\circ}\text{C}$ , nehořlavý. SA 75 je čirá bezbarvá kapalina [23].

### 3.3. Přístroje použité v experimentální části

#### 3.3.1. Přístroj na stanovení pevnosti LRu-2e

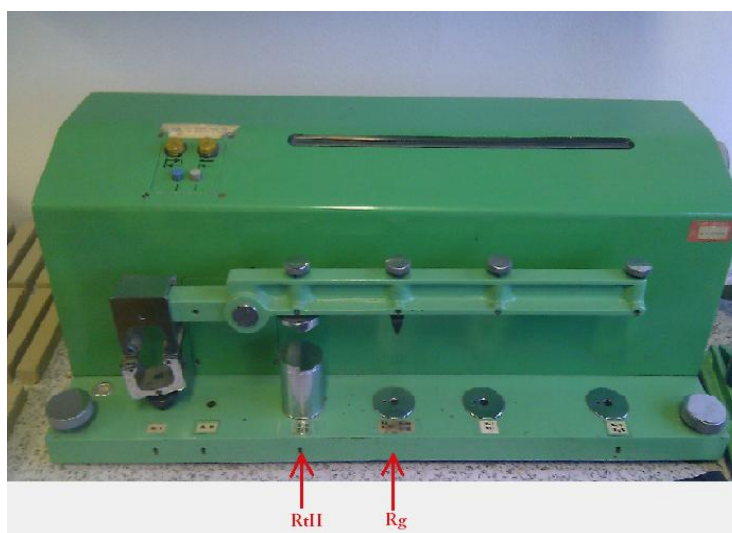
Přístroj je určen k měření pevnosti formovacích a jádrových směsí na zkušebních tělesech ve stavu jak syrovém, tak i vysušeném či vytvrzeném. Přístroj umožňuje měřit pevnost v tlaku, tahu, ohybu, stříhu, dvojitém stříhu a štěpu. Přístroj se ovládá ručně pomocí dvou tlačítek, první na počátek zkoušky a druhé tlačítko vrací ručičku, která ukazuje hodnoty pevnosti na ose. Hmotnost přístroje s vybavením je cca 90  $[\text{kg}]$  a jeho rozměry jsou 780 x 290 x 300  $[\text{mm}]$ . Součástí

přístroje jsou další přídavná zařízení k jednotlivým měřením. Na tah, tlak a střih se používají různé čelisti k připevnění zkušebních těles, na zkoušku ohybem se přidává nosník s dvěma podpěrami, který drží zkušební hranol a trn, který na hranol tlačí určitou silou. Přístroj vyrábí firma Morek Multiserw, zkouška na něm byla provedena v laboratoři katedry strojírenské technologie, TU v Liberci.

Všechny zaznamenané hodnoty se přímo odečtou ze stupnice, která se pro každou mechanickou zkoušku nastaví. Hodnoty jsou uvedeny v [MPa].

V diplomové práci byl použit přístroj na měření pevnosti ve střihu a ohybu. Na střih se upnulo zkušební těleso – váleček o průměru 50 [mm] a výšce 50 [mm], do sebe zapadajících čelistí. Čelisti byly v poloze  $R_{tII}$ , což je druhý stupeň pro střih, kde se naměřily hodnoty v rozsahu 0,1 až 0,526 [MPa], nebo  $R_{tIII}$  v rozsahu 0,3 až 1,560 [MPa]. Stupnici  $R_{tI}$ , která je do hodnoty 0,174 [MPa] se nepoužívala, neboť jádrové směsi byly natolik tvrdé, že tato stupnice nestačila [24].

Pro zkoušku ohybem se položil zkušební hranol na dvě podpěry na nosníku, trn nastavil tak, aby se lehce hranolu dotýkal. Nastavila se stupnice  $R_g$ , která pracuje v rozsahu hodnot 0 až 8,6 [MPa].



Obr. 3-7: Přístroj na měření pevnosti ve střihu (pozice  $R_{tII}$ ), v ohybu (pozice  $R_g$ )



a)



b)

Obr. 3-8: Umístění zkušebních těles, a) pevnost ve střihu, b) pevnost v ohybu

### 3.3.2. Laboratorní kolový mísič LM-2e

Laboratorní kolový mísič je určen k přípravě formovacích a jádrových směsí, obalování písku pojivem nebo k drcení a mletí keramických materiálů, jejichž tvrdost nedosahuje pátého stupně Moshovi stupnice. Mísič je též od firmy Morek Multiserw. Jeho minimální přípustné naplnění mísy je 5 [kg] a mísicí systém dokáže udělat 40 otáček za minutu. Mísa je průměru 500 [mm] a výšky 240 [mm], kolo má průměr 260 [mm] na 70 [mm] výšky. Laboratorní kolový mísič se ovládá přepínáním na klávesnici, nastavením přesného programu, který určuje jak otáčky, tak přesný čas mletí. Do kolového mísiče se ručně vsypává písek a přilévá pojivo, které se předem přesně naváží. Formovací směs se vysype do přistavené nádoby po otevření otvoru v míse [24].



Obr. 3-9: Laboratorní kolový mísič LM-2e, umístěný v laboratoři Katedry strojírenské technologie

### 3.3.3. Průběžný mísič

Průběžný mísič slouží k přípravě zejména samotuhnoucí směsi pro výrobu slévárenských forem nebo jader promícháním slévárenského písku a přísad. Přísady jsou dodávány dávkovacími čerpadly umístěnými v čerpadlové skříně a hadicemi propojeny s tryskami. Míchání provádí hřídel s nastavenými lopatkami, které jsou umístěny v rozevíratelném tubusu. Písek je přiveden z násypky přes regulační klapku do zadní části míchací komory, ve které se otáčí hřídel s lopatkami. V zadní části míchací komory jsou také zaústěny trysky pro přívod pryskyřice a tvrdidla. Po spuštění mísiče začne elektromotor otáčet hřídelem s lopatkami a současně dochází k otevření přívodu písku do míchací komory. Po předem nastaveném čase dochází k zapnutí čerpadel dodávajících potřebné přísady do trysek v tubusu. Otáčením hřídele v tubusu dochází k intenzivnímu promíchání přísad a písku, lopatky dopravují promíchanou směs směrem k výpustnému otvoru a směs tak vypadává do přistavěné nádoby a je připravená k použití. Hmotnost stroje je 500 [kg], hmotnost čerpadlové a elektrické jednotky 100 [kg]. Tlak vzduchu odpovídá 6 [Mpa], ovládání je pomocí digitálního displeje.



Samotuhnoucí směsi se promíchaly v průběžném mísiči ve firmě Unitherm, s.r.o., která ho zakoupila od firmy Gifos, s.r.o. [25].

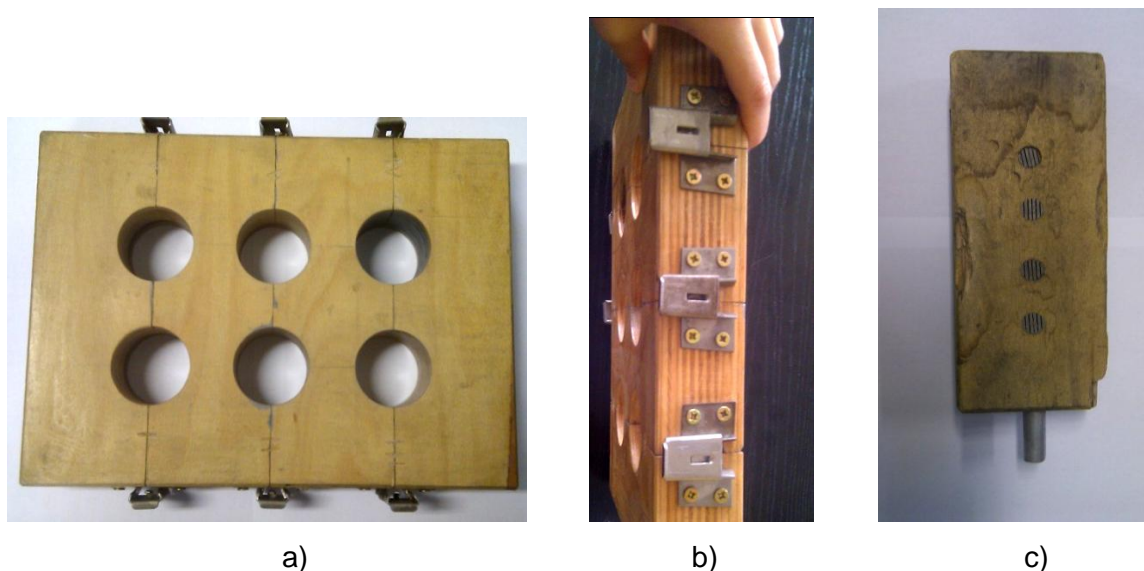


Obr. 3-10: Ilustrační foto průběžného mísiče od firmy Gifos, s.r.o. [25]

### 3.3.4. Jaderníky

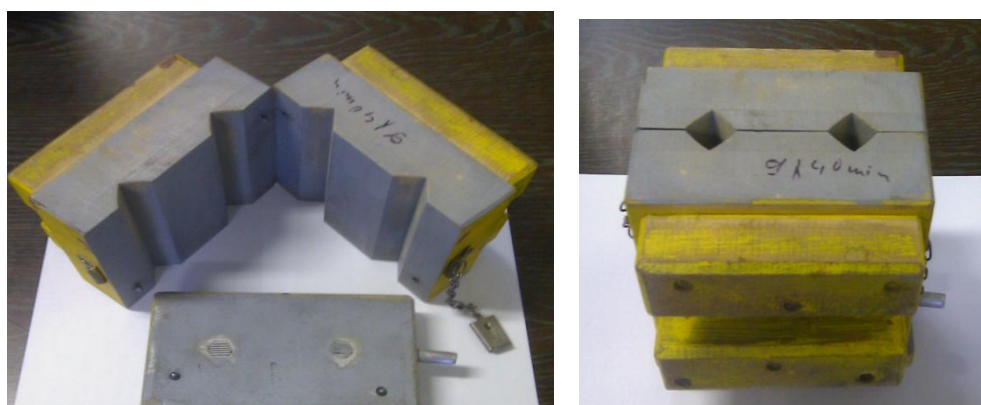
Ke zhotovení zkušebních těles (váleček, hranol) firma Unitherm, s.r.o. dodala přesně vytvořené dřevěné jaderníky.

Jaderník pro zkušební těleso na stříh – váleček, který má průměr podstavy 50 [mm] a výšku  $50 \pm 0,3$  [mm], je šesti- násobný. Dřevěný jaderník je rozdělen na 4 části, které se do sebe skládají pomocí vodících kolíků. Všechny kusy se k sobě připevní pomocí zámků a tak se vytvoří jeden celek, který má v sobě 6 dutin odpovídajících tvarem jádru – normovaného válečku. K šesti-násobnému jaderníku byla zapůjčena i pracovní deska, která slouží pro jaderník jako dno.



Obr. 3-11: a) Šesti-násobný jaderník pro zkušební těleso – váleček, b) zámky jaderníku, c) univerzální mrazicí destička

Jaderník pro zkušební těleso na mechanickou zkoušku ohybem – hranol o čtvercovém průřezu 22,36 x 22,36 [mm] a délce 170 [mm], je dvoudílný a dvojnásobný. Jaderník je též vyroben ze dřeva, skládá se pomocí vodících kolíků a je opatřen zámky. Podstavu pro jaderník tvoří dřevěná destička, která slouží jako mrazicí destička. Má odvzdušňovací síťka a výstupní trubičku, na kterou se připojí hadice. Touto hadicí přes odvzdušňovací síťka do jader proniká plyn  $\text{CO}_2$  a jádra jsou tak vytvrzována. Tato metoda vytvrzování je známá jako metoda CT.



Obr. 3-12: Dvoj-násobný jaderník pro zkušební těleso – hranol

Šesti-násobný jaderník pro válečky se vytvrdí obdobně. Od firmy Unitherm, s.r.o. byla zapůjčena další mrazící destička, která je samostatná, univerzální, a na jaderníky se přikládá postupně. Její rozměry jsou 190 x 77 x 25 [mm], obsahuje 4 odvzdušňovací sítky o průměru 12 [mm].

### 3.3.5. Ostatní přístroje

**1. Digitální váhy značky Radwag** sloužící k přesnému navážení ostřiva a pojiva. Váhy váží do maximální hmotnosti 4 [kg], takže vzhledem k celkové hmotnosti slévárenského písku 5 [kg] bylo vážení prováděno nadvakrát. Váhy mají digitální displej, je třeba je přesně vyrovnat na pracovní desce. U těchto vah je samozřejmostí automatická kalibrace, možnost vynulování. Dokáží vážit s přesností na 3 desetinná místa.



Obr. 3-13: Digitální váhy Radwag

**2. Laboratorní mraznička** sloužila v experimentu pro umělé navození teploty okolí, neboť teplota písku byla stanovena na teploty 5, 10 a 20 [°C]. Mraznička se ovládá pomocí tlačítek u digitálního displeje, pracuje v rozmezích teplot -10 až -50 [°C]. Laboratorní mraznička mimo jiné obsahuje i zvukový signál k upozornění dosažené teploty.



Obr. 3-14: Laboratorní mraznička

**3. IR - teploměr s kamerou od firmy Voltcraft** měřil teplotu slévárenského písku, se kterým se v experimentální části diplomové práce pracovalo. Teplota byla měřena na přesně naváženém ostřivu vyndaném z mrazničky a následně byl písek s danou teplotou přendán do kolového mísiče, kde se s ním ihned pracovalo.

Bezkontaktní infračervený teploměr s integrovanou digitální barevnou kamerou obsahuje 5,5 [cm] velký displej TFT, na kterém se ukazuje obraz společně s naměřenou hodnotou teploty a ostatními parametry. Tento obraz lze uložit do integrované paměti Flash nebo na kartu microSD jako obrázek JPG nebo videosoubor 3GP. Duální laser umožňuje jednoduché bodové měření s přesným označením měřených míst. Jeho rozměry jsou 155 x 62 x 205 [mm], kalibrace je dle normy ISO/DKD. Měřicí rozsah pro teplotu rosného bodu/vzduchu je 0 až 50 [°C], pro vlhkost vzduchu 0 až 100 [%]. Stupeň emisivity  $\varepsilon$  je 0,10 až 1,00, rozsah měření teploty je -50 až +1000 [°C]. Teploměr váží pouhých 410 [g]. Díky dvojitému fixačnímu laseru a nastavitelné emisivitě je dosaženo přesnosti při zaměřování i vysoké přesnosti měření. O plynulé bodové měření se postará velmi krátká reakční doba. Nastavení stupně emisivity je pro neznámý povrch zajištěn prostřednictvím kontaktního měření teploty (typ K).

Tak se nastavil teploměr i na měření písku a byly obdrženy vždy nejpresnější naměřené hodnoty, které se dodatečně ještě kontrolovaly klasickým rtuťovým teploměrem. Aby teplota písku byla opravdu přesná a teploměr neměřil jen teplotu písku na povrchu pracovní nádoby, písek se po vyjmutí z mrazničky několikrát promíchal a poté teprve měřil teploměrem. Lze říci, že teplota písku

naměřená teploměrem Voltcraft byla pro celé navážené množství písku konstantní a měření teploty bylo velmi přesné [26].



Obr. 3-15: IR - teploměr s kamerou [26]

**4. Láhev s plynem CO<sub>2</sub>** k vytvrzování jádrových směsí od firmy Air Products Slovakia, s.r.o. K láhvi byl přišroubován ventil, který svým závitem přesně odpovídal k plynu CO<sub>2</sub>. Od něho vedla připevněná gumová hadice, která se následně napojila přímo k mrazicí destičce. Tlak plynu a doba vytvrzování směsi byla pro všechny CT směsi konstantní.

### 3.4. Příprava jádrových směsí

U jádrových směsí vytvrzovaných pomocí CO<sub>2</sub> se nejprve pečlivě navážilo ostřívo a pojivo. Ostřívo jak kulaté, tak ostrohranné, vážilo vždy 5 [kg] na jedno namíchání směsi. Vzhledem k různému druhu pojiva se jeho váha odvíjela od pracovních návodů společnosti Unitherm s.r.o., která byla přepočtena na váhu ostřiva.

Tab.3.3.: Přepočet množství pojiva na váhu 5 [kg] ostřiva

pojivo	množství pojiva udané v [%] na hmotnost ostřiva	přepočet na 5 [kg] ostřiva, udané v [kg]
Ecolotec	2,0 [%]	0,10 [kg]
Desil J	3,6 [%]	0,18 [kg]
Geopol 618 - CT	2,8 [%] + 0,7 [%] Geoteku 007	0,14 [kg] + 0,0350 [kg] Geoteku 007
Geopol 618 - ST	1,8 [%] + 15 [%] SA 75 na váhu pojiva	0,09 [kg] + 0,0135 [kg] SA 75

Po navážení ostřiva a pojiva se zjišťovala teplota ostřiva. V experimentální části se zkoušela teplota ostřiva 5,10,20 [°C]. U teploty 5 a 10 [°C] se slévárenský písek chladil určitou dobu v laboratorní mrazničce, teplota se zjišťovala infračerveným teploměrem s kamerou. Písek s určitou teplotou se přesypal do kolového mísiče, nastavil se program míchání na 3 [min], který byl pro všechny směsi konstantní. Po 20 [s] se přidalo pojivo. Po rozmíchání se ručně otevřel otvor a jádrová směs přepadla do pracovní nádoby a byla ihned připravena ke zpracování.

Jediný rozdíl v pořadí pojiva byl u geopolymerů. Nejdříve se vsypal slévárenský písek do mísiče, následoval Geotek 007, který se 1 [min] nechal promíchat a poté se přidalo pojivo Geopol 618, celá směs se pak 3 [min] promíchala.

Do jaderníků, které byly na pracovním stole, se začala plnit jádrová směs. Bylo velmi důležité, aby směs v jadernících byla dobře upěchovaná. Proto do jaderníku na válečky se směs upěchovala ručně – prsty, do jaderníku pro hranoly to bylo trochu náročnější, použila se kovová tyč menšího průměru. Po napěchování jaderníků jádrovou směsí se písek zahladil pomocí dřevěné stěrky, díky které se uhladila plocha zkušebních těles. Nyní byla jádra připravena k vytvrzení. Vytvrzení pomocí CO<sub>2</sub> probíhalo pomocí mrazících destiček, které se na jádra pokládaly. Čas a dávkování média byl pro všechny směsi konstantní. Čas vytvrzování se dotykem odzkoušel na zkušebních tělíscích (hmatem jejich dostatečná tvrdost) a následně byl určen na 20 [s], průtok  $Q_V$  CO<sub>2</sub> je 2 [dm<sup>3</sup>/min]. Čas i průtok byl zkontrolován a schválen technology společnosti Unitherm, s.r.o., zároveň vyčten z odborného článku [27].

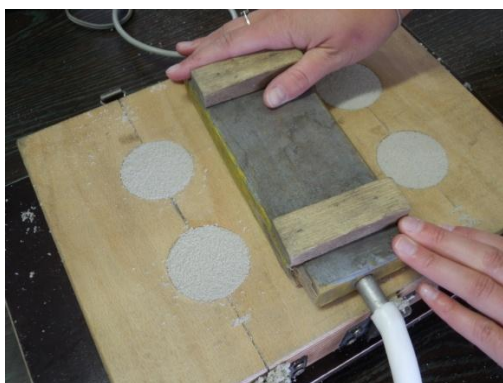




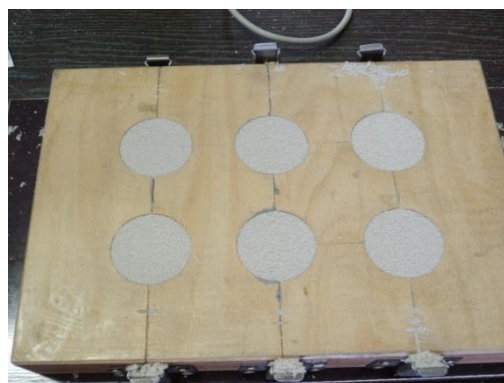
Obr. 3-16: Upěchování písku



Obr. 3-17: Zahlazení povrchu



Obr. 3-18: Vytvrzování pomocí CO<sub>2</sub>



Obr. 3-19: Vytvrzená jádra

Po vytvrzení bylo možné jaderníky rozebrat, jádra odstavit na pracovní desku. Ihned po vytvrzení je zapsán čas. Mechanické zkoušky jsou provedeny po 30 – ti [min] a 24 [hod] od vytvrzení.

Z jaderníků se odstranily zbytky písku, sestavily se zpět do původní polohy, zabezpečily se zámky. Jaderníky byly připraveny pro další použití, celý proces se opakoval.

U samotuhnoucích směsí byl zjištěn problém s mícháním směsi, neboť kolový míšič není pro samotuhnoucí směsi vhodný. To se projevilo v buď netuhnutí směsi, či špatně promíchané směsi, následně pak v pevnostních zkouškách, které jsou uvedeny v kapitolách 3.5.10. – 3.5.12. Samotuhnoucí směs se proto míchala v míšiči průběžném, přímo ve firmě Unitherm, s.r.o.. Vzorky byly

v jadernících 15 [min], než ztuhly, následně byly vyjmuty a obdobně na nich byly provedeny mechanické zkoušky po 30-ti [min] a 24 [hod]. Zkoušky na zkušebních tělískách byly též provedeny ve firmě Unitherm, s.r.o. na obdobném pevnostním přístroji. Zkoušení se samotuhnoucími směsí v průběžném míšiči ve společnosti Unitherm, s.r.o. nebylo možné provést pro teplotu 5 [°C] z provozních důvodů a zároveň nebylo možné zkoušky provést pro kulaté ostřívo SP 28, též z provozních důvodů.

### 3.5. Zkoušení mechanických vlastností

S použitím výše uvedených zařízení byly provedeny zkoušky mechanických vlastností sledovaných jádrových směsí, které jsou zaznamenány do tabulek v následujících kapitolách. Každá kapitola je pro určité pojivo a jeden z dvou druhů slévárenského písku, resp. ostřívo. Veškeré možné kombinace jsou znázorněny v obr. 3.20. Pro každou kombinaci bylo provedeno 10 měření. V tabulkách jsou uvedeny hodnoty jednotlivých měření pevnosti ve stříhu a ohybu po 30 min a 24 hod od vytvrzení. Hodnoty jsou uvedeny v kPa. Ve spodní části tabulek je následně vypočítán průměr dle vzorce 3.1., který je zaokrouhlen na celá čísla.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

kde:  $x_{1-10}$  - jednotlivá měření [kPa];

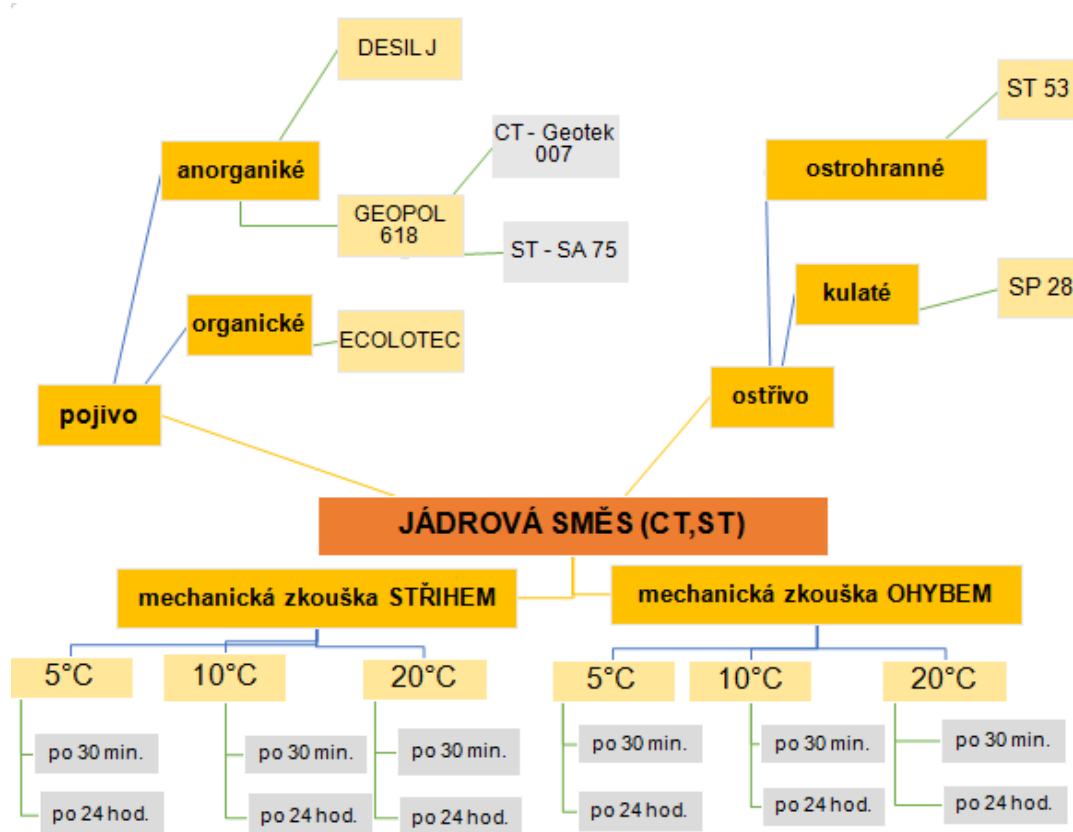
$n$  - 10; počet měření.

Dále jsou uvedeny největší a nejmenší hodnoty pevnosti, které byly v 10-ti měřeních zaznamenány. Počet vytvořených zkušebních těles – válečků a hranolů, je uveden v tab.3.4.



Tab.3.4.: Celkový počet vytvořených zkušebních těles

Jádrové směsi s pojivem:	počet válečků na stříh	počet hranolů na ohyb
Ecolotec	120	120
Desil J	120	120
Geopol 618	120	120
Geopol 618 - ST	120	120
Geopol 618 –ST – Unitherm, s.r.o.	50	50
celkem	530	530
	<b>Σ</b>	<b>1060 zkušebních těles</b>



Obr. 3-20: Schéma vyrobených jádrových směsí a mechanických zkoušek

### 3.5.1. Ostřivo ST 53, pojivo Ecolotec

A.

Tab.3.5.: Měření směsi ST 53, Ecolotec, 5 [°C]

ostřivo ST 53  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Ecolotec  
množství pojiva 0,1 [kg]  
teplota ostřiva 5 [°C]  
doba míchání 3 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH 30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH 24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 30 min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 24h.}}$ [kPa]
1	150	250	400	600
2	165	350	300	400
3	160	400	450	450
4	150	375	400	400
5	150	345	400	300
6	145	375	400	300
7	130	395	400	300
8	150	300	350	300
9	135	320	350	400
10	145	335	350	300
$\bar{x}$	148	345	380	375
max	165	400	450	600
min	130	250	300	300

B.

Tab.3.6.: Měření směsi ST 53, Ecolotec, 10 [°C]

ostřivo ST 53  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Ecolotec  
množství pojiva 0,1 [kg]  
teplota ostřiva 10 [°C]  
doba míchání 3 [min]



číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH 30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH 24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 30 min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 24h.}}$ [kPa]
1	150	215	350	300
2	145	250	300	250
3	120	240	300	250
4	130	200	300	200
5	100	225	250	200
6	140	210	300	250
7	135	220	300	300
8	100	230	250	200
9	125	235	300	250
10	130	200	250	200
$\bar{x}$	128	223	290	240
max	150	250	350	300
min	100	200	250	200

Obr. 3-21: Zkušební tělesa směsi ST 53, Ecolotec

### C.

Tab.3.7.: Měření směsi ST 53, Ecolotec, 20 [°C]

ostřivo ST 53  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Ecolotec  
množství pojiva 0,1 [kg]  
teplota ostřiva 20 [°C]  
doba míchání 3 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	175	240	300	200
2	180	250	450	300
3	160	230	300	200
4	185	245	400	200
5	160	210	250	200
6	180	215	250	300
7	160	230	300	300
8	155	200	300	300
9	165	190	400	350
10	160	165	350	300
$\bar{x}$	<b>168</b>	<b>218</b>	<b>330</b>	<b>265</b>
max	185	250	450	350
min	155	165	250	200

### 3.5.2. Ostřivo SP 28, pojivo Ecolotec

#### A.

Tab.3.8.: Měření směsi SP 28, Ecolotec, 5 [°C]

ostřivo SP 28  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Ecolotec  
množství pojiva 0,1 [kg]  
teplota ostřiva 5 [°C]  
doba míchání 3 [min]



číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	165	245	400	450
2	155	225	500	500
3	145	255	400	350
4	165	250	350	400
5	145	265	400	400
6	155	225	400	400
7	160	245	350	350
8	145	255	300	300
9	150	220	300	400
10	145	245	300	400
$\bar{x}$	<b>153</b>	<b>243</b>	<b>370</b>	<b>395</b>
max	165	265	500	500
min	145	220	300	300

Obr. 3-22: Zkušební tělesa směsi SP 28, Ecolotec

## B.

Tab.3.9.: Měření směsi SP 28, Ecolotec, 10 [°C]

ostřivo  
množství ostřiva  
pojivo  
množství pojiva  
teplota ostřiva  
doba míchání

SP 28  
5 [kg]  
Ecolotec  
0,1 [kg]  
10 [°C]  
3 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	250	385	800	550
2	245	375	500	650
3	240	375	500	700
4	270	320	700	800
5	250	355	500	800
6	265	350	700	800
7	245	375	650	600
8	240	385	550	500
9	250	350	500	500
10	265	365	750	500
$\bar{x}$	<b>252</b>	<b>364</b>	<b>615</b>	<b>640</b>
max	270	385	800	800
min	240	320	500	500

## C.

Tab.3.10.: Měření směsi SP 28, Ecolotec, 20 [°C]

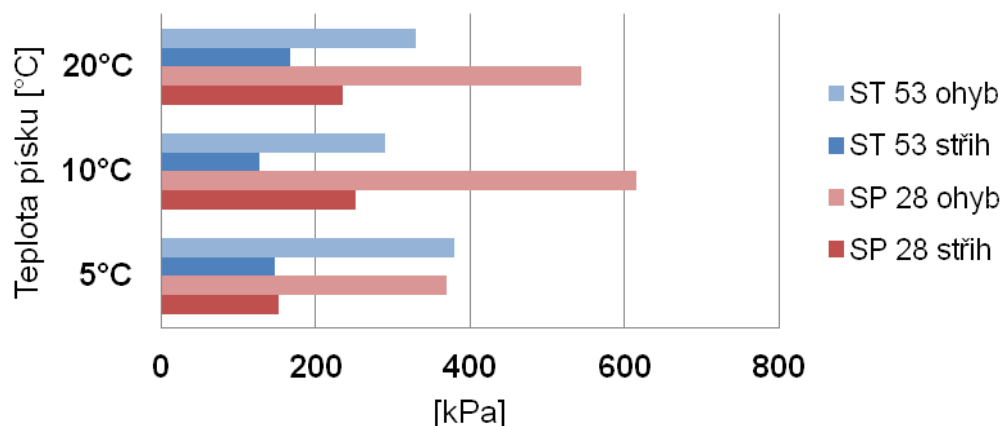
ostřivo  
množství ostřiva  
pojivo  
množství pojiva  
teplota ostřiva  
doba míchání

SP 28  
5 [kg]  
Ecolotec  
0,1 [kg]  
20 [°C]  
3 [min]

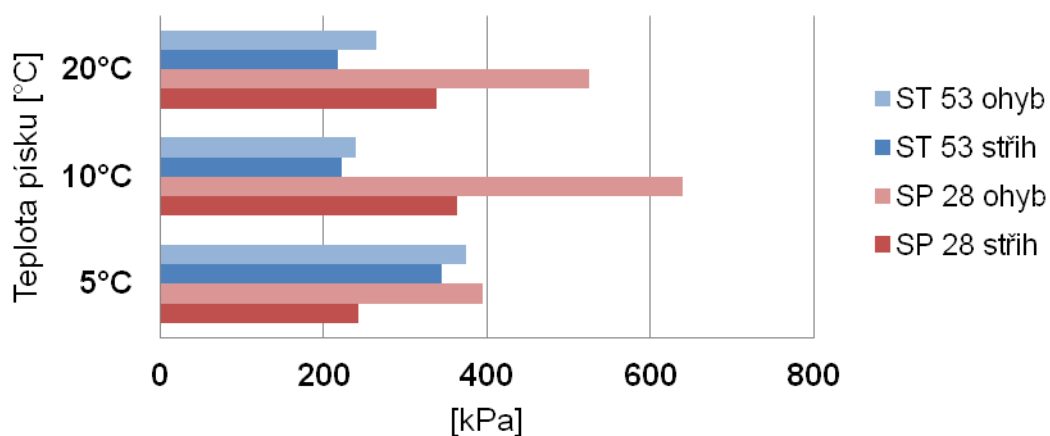
číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	250	340	650	650
2	200	330	500	600
3	250	355	550	500
4	240	350	450	450
5	250	350	550	450
6	260	360	500	500
7	225	300	450	500
8	250	340	600	600
9	200	350	550	500
10	225	310	650	500
$\bar{x}$	<b>235</b>	<b>339</b>	<b>545</b>	<b>525</b>
max	260	360	650	650
min	200	300	450	450

### 3.5.3. Vyhodnocení mechanických zkoušek CT- jádrových směsí s pojivem Ecolotec

Jádrové směsi s organickým pojivem Ecolotec se vyznačovaly velkou pevností jak ve stříhu, tak i v ohybu. Z průměrného výsledku 10-ti měření se ukázalo, že lépe, ve stříhu i v ohybu, byl na tom slévárenský písek s kulatým ostřivem SP 28. Z obou grafů je zcela jasné, že u této jádrové směsi se ukazuje výrazný pokles mechanických vlastností, která měla průměrnou teplotu 5 [°C]. U teplot 10 – 20 [°C] se výsledky zkoušek měnily pouze nepatrně. Zkoušky pevnosti u teploty 5 [°C] byly zhruba o polovinu menší, než tomu bylo u teplot 10 a 20 [°C], jak u zkoušek po 30-ti. [min], tak i po 24 [hod]. Je velmi zvláštní, že směs s ostřivem ST 53 se vyznačovala většími pevnostmi u teploty 5 [°C] po 24 [hod]. I přes to však nedosahovala srovnatelných hodnot jako u teplot vyšších za stejnou časovou dobu. Proto toto hodnocení u teploty 5 [°C] lze považovat za nesprávné, lze ho považovat za anomálii. Je možné či velmi pravděpodobné, že došlo k větší časové prodlevě v mísiči, a tak se písek stačil ohřát na vyšší teplotu. Z výsledků je patné, že k těmto výsledkům by se v budoucnu při dodržení stejných podmínek již nedostalo. Je velmi zajímavé, že u zkoušky pevnosti ve stříhu se po 24 [hod]. výrazně zvýšila pevnost, a to o 40 - 60 [%], za to pevnost v ohybu byla buď stabilní, nebo se zvýšila pouze nepatrně a někdy se i ukázalo, že po 24 [hod] i mírně klesala, a to zhruba o 10 [%]. O poklesu pevnosti v ohybu se již zmiňoval Ing. Jiří Fošum ve své publikaci [27], a výsledky v této diplomové práci to potvrzují. Za konec doby zpracovatelnosti lze považovat pokles pevnosti v ohybu o více než 1/3 oproti čerstvě namíchané směsi. Při zohlednění obou mechanických zkoušek se doporučil pro jádrovou směs s pojivem Ecolotec slévárenský písek kulatý SP 28, při teplotách vyšších jak 10 [°C] včetně. U výběru jádrové směsi měla větší váhu vyšší pevnost ve stříhu, než – li pevnost v ohybu. Vycházelo se tak po konzultaci s technologi, zohlednění umístění a upevnění jader ve formách a tlaku tavicího kovu, který se vlévá přes vtokovou soustavu k jádru.



Graf. 3.1.: Srovnání mechanických zkoušek směsi s pojivem Ecolotec, po 30 [min] od vytvrzení



Graf. 3.2.: Srovnání mechanických zkoušek směsi s pojivem Ecolotec, po 24 [hod] od vytvrzení

### 3.5.4. Ostřivo ST 53, pojivo Desil J

A.

Tab.3.11.: Měření směsi ST 53, Desil J, 5 [°C]

ostřivo ST 53  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Desil J  
množství pojiva 0,180 [kg]  
teplota ostřiva 5 [°C]  
doba míchání 3 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH 30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH 24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 24h.}}$ [kPa]
1	215	195	450	300
2	205	165	250	250
3	195	175	450	250
4	205	160	350	200
5	190	125	200	200
6	195	145	350	200
7	205	150	400	250
8	185	145	350	200
9	195	155	250	200
10	185	165	250	250
$\bar{x}$	<b>198</b>	<b>158</b>	<b>330</b>	<b>230</b>
max	215	195	450	300
min	185	125	200	200

B.

Tab.3.12.: Měření směsi ST 53, Desil J, 10 [°C]

ostřivo ST 53  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Desil J  
množství pojiva 0,180 [kg]  
teplota ostřiva 10 [°C]  
doba míchání 3 [min]



číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH 30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH 24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 30 min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 24h.}}$ [kPa]
1	200	185	450	400
2	215	200	500	450
3	205	215	550	400
4	160	195	500	500
5	205	200	450	450
6	200	195	500	650
7	200	205	250	600
8	205	195	350	550
9	220	220	500	500
10	215	190	450	450
$\bar{x}$	<b>203</b>	<b>200</b>	<b>450</b>	<b>495</b>
max	220	220	550	650
min	160	185	250	400

Obr. 3-23: Zkušební tělesa směsi ST 53, Desil J

### C.

Tab.3.13.: Měření směsi ST 53, Desil J, 20 [°C]

ostřivo ST 53  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Desil J  
množství pojiva 0,180 [kg]  
teplota ostřiva 20 [°C]  
doba míchání 3 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{30 min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{24h.}}$ [kPa]
1	230	165	350	400
2	205	170	250	400
3	200	195	450	400
4	205	215	400	450
5	210	195	350	500
6	215	195	850	450
7	195	170	700	400
8	185	190	300	400
9	200	225	350	450
10	220	200	350	500
$\bar{x}$	<b>207</b>	<b>192</b>	<b>435</b>	<b>435</b>
max	230	225	850	500
min	185	165	250	400

### 3.5.5. Ostřivo SP 28, pojivo Desil J

#### A.

Tab.3.14.: Měření směsi SP 28, Desil J, 5 [°C]

ostřivo SP 28  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Desil J  
množství pojiva 0,180 [kg]  
teplota ostřiva 5 [°C]  
doba míchání 3 [min]



číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{30 min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{24h.}}$ [kPa]
1	165	135	250	105
2	155	145	300	100
3	165	165	200	100
4	155	170	250	150
5	150	140	300	100
6	170	160	200	200
7	155	155	200	150
8	165	140	350	150
9	150	150	300	150
10	155	135	300	100
$\bar{x}$	<b>159</b>	<b>150</b>	<b>265</b>	<b>131</b>
max	170	170	350	200
min	150	135	200	100

Obr. 3-24: Zkušební tělesa směsi SP 28, Desil J



## B.

Tab.3.15.: Měření směsi SP 28, Desil J, 10 [°C]

ostřivo SP 28  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Desil J  
množství pojiva 0,180 [kg]  
teplota ostřiva 10 [°C]  
doba míchání 3 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	150	175	450	450
2	250	185	250	400
3	185	150	300	500
4	185	185	500	550
5	165	185	300	350
6	185	175	350	450
7	160	200	400	400
8	175	180	300	400
9	185	200	350	400
10	180	200	350	450
$\bar{x}$	182	184	355	435
max	250	200	500	550
min	150	150	250	350

## C.

Tab.3.16.: Měření směsi SP 28, Desil J, 20 [°C]

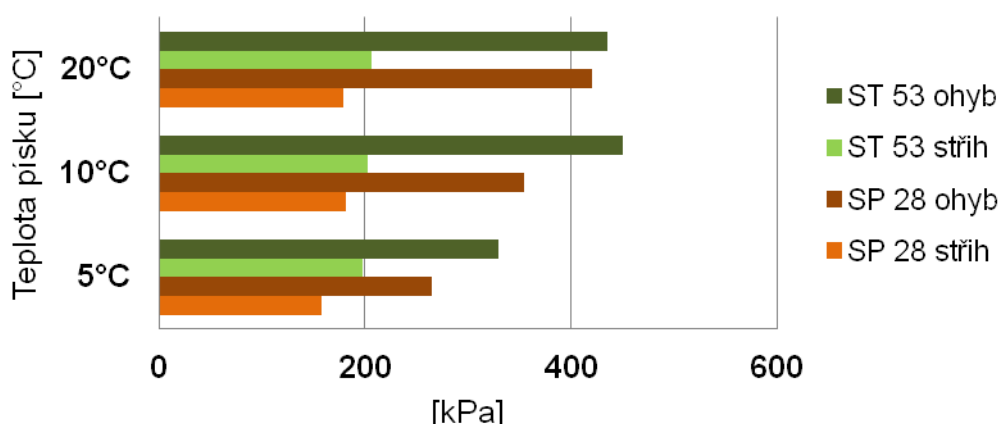
ostřivo SP 28  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Desil J  
množství pojiva 0,180 [kg]  
teplota ostřiva 20 [°C]  
doba míchání 3 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	185	165	250	450
2	185	175	500	400
3	190	215	450	400
4	165	185	400	350
5	185	170	450	400
6	165	165	350	350
7	170	175	450	350
8	150	175	500	350
9	195	170	450	400
10	205	170	400	350
$\bar{x}$	180	177	420	380
max	205	215	500	450
min	150	165	250	350

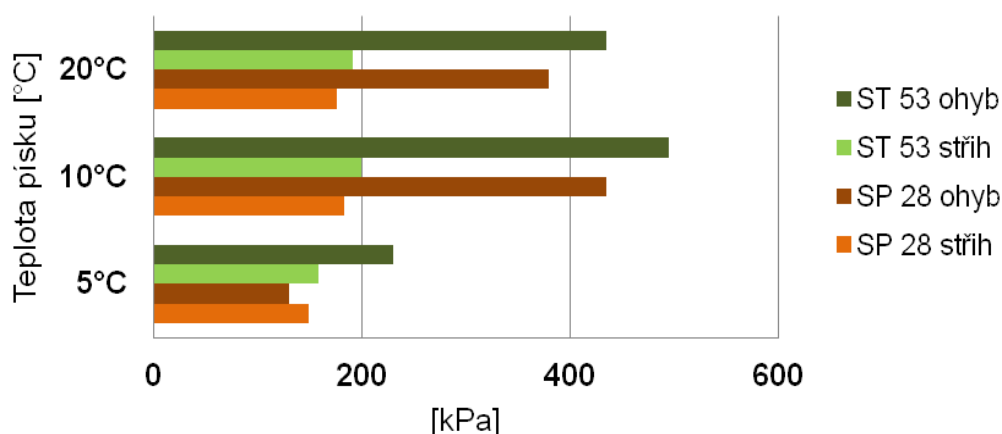
### 3.5.6. Vyhodnocení mechanických zkoušek CT- jádrových směsí s pojivem Desil J

Jádrové směsi s anorganickým pojivem - vodním sklem pod názvem Desil J se nevyznačovaly nijak velkou pevností ve stříhu a ani v ohybu. Z průměrného výsledku 10-ti měření se ukázalo, že Desil J se vyznačuje nejmenší možnou pevností ze zkoušených směsí. Jak u Ecolotecu, tak i u Desilu J se potvrzuje výrazný pokles mechanických vlastností u teploty 5 [°C]. U jádrové směsi s pojivem Desil J se doporučuje ostřívo ST 53, u kterého bylo naměřeno cca 500 [kPa] v ohybu a 200 [kPa] ve stříhu, za teplot vyšších jak 10 [°C] včetně.

Pokud se nebude tolik hledět v praxi na pevnostní vlastnosti, pak se dá říci, že Desil J je velmi vhodný pro výrobu jader, neboť jako anorganické pojivo nezatěžuje životní prostředí tolik, jako pojivo organické – Ecolotec. Desil J se též vyznačuje dobrou rozpadavostí, která velmi přispívá v praxi k tomu, aby měl Desil J větší uplatnění než-li pojivo Ecolotec. Lze ho určitě použít pro výrobu středních či menších jader. Pro větší jádra, se kterými se musí manipulovat, se z hlediska pevnostní charakteristiky nedoporučuje.



Graf. 3.3.: Srovnání mechanických zkoušek směsi s pojivem Desil J, po 30 [min]



Graf. 3.4.: Srovnání mechanických zkoušek směsi s pojivem Desil J, po 24 [hod]

### 3.5.7. Ostřivo ST 53, pojivo Geopol 618

A.

Tab.3.17.:Měření směsi ST 53, Geopol 618, 5[°C]

ostřivo ST 53  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Geopol 618  
množství pojiva 0,140 [kg]  
akcelarátor Geotek 007  
množství 0,035 [kg]  
teplota ostřiva 5 [°C]  
doba předmíchání 1 [min]  
doba míchání 3 [min]



číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH 30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH 24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 30 min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 24h.}}$ [kPa]
1	175	185	500	500
2	165	190	500	500
3	160	185	400	500
4	175	190	500	500
5	185	190	650	500
6	175	200	500	450
7	175	205	400	500
8	185	175	300	450
9	170	175	300	500
10	175	170	450	500
$\bar{x}$	174	187	450	490
max	185	205	650	500
min	160	170	300	450

Obr. 3-25: Zkušební tělesa směsi ST 53, Geopol 618

**B.**

Tab.3.18.: Měření směsi ST 53, Geopol 618, 10 [°C]

ostřivo ST 53  
 množství ostřiva 5 [kg]  
 pojivo Geopol 618  
 množství pojiva 0,140 [kg]  
 akcelerátor Geotek 007  
 množství 0,035 [kg]  
 teplota ostřiva 10 [°C]  
 doba předmíchání 1 [min]  
 doba míchání 3 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	230	270	600	500
2	225	275	500	500
3	250	270	800	600
4	200	275	750	750
5	245	285	650	800
6	230	270	500	800
7	225	285	800	750
8	220	260	650	550
9	250	255	500	600
10	225	250	500	500
$\bar{x}$	230	269,5	625	635
max	250	285	800	800
min	200	250	500	500

**C.**

Tab.3.19.: Měření směsi ST 53, Geopol 618, 20 [°C]

ostřivo ST 53  
 množství ostřiva 5 [kg]  
 pojivo Geopol 618  
 množství pojiva 0,140 [kg]  
 akcelerátor Geotek 007  
 množství 0,035 [kg]  
 teplota ostřiva 20 [°C]  
 doba předmíchání 1 [min]  
 doba míchání 3 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	180	245	650	500
2	220	280	500	700
3	240	260	700	550
4	250	245	500	600
5	230	240	700	600
6	255	270	650	600
7	250	240	550	650
8	235	240	750	700
9	200	225	600	700
10	225	240	650	500
$\bar{x}$	229	249	625	610
max	255	280	750	700
min	180	225	500	500

### 3.5.8. Ostřivo SP 28, pojivo Geopol 618

**A.**

Tab.3.20.: Měření směsi SP 28, Geopol 618, 5 [°C]

ostřivo SP 28  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Geopol 618  
množství pojiva 0,140 [kg]  
akcelerátor Geotek 007  
množství 0,035 [kg]  
teplota ostřiva 5 [°C]  
doba předmíchání 1 [min]  
doba míchání 3 [min]



číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	200	170	600	600
2	185	170	700	500
3	195	185	650	700
4	170	200	800	650
5	185	190	600	600
6	215	200	500	700
7	195	170	450	500
8	170	180	500	500
9	185	200	600	600
10	165	180	600	650
$\bar{x}$	187	184,5	600	600
max	215	200	800	700
min	165	170	450	500

Obr. 3-26: Zkušební tělesa směsi SP 28, Geopol 618

**B.**

Tab.3.21.: Měření směsi SP 28, Geopol 618, 10 [°C]

ostřivo SP 28  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Geopol 618  
množství pojiva 0,140 [kg]  
akcelerátor Geotek 007  
množství 0,035 [kg]  
teplota ostřiva 10 [°C]  
doba předmíchání 1 [min]  
doba míchání 3 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	200	280	600	600
2	200	270	600	700
3	225	290	700	650
4	240	280	750	750
5	230	270	550	600
6	200	270	550	750
7	245	285	650	800
8	215	275	700	600
9	225	280	700	600
10	235	300	600	700
$\bar{x}$	222	280	640	675
max	245	300	750	800
min	200	270	550	600

### C.

Tab.3.22.: Měření směsi SP 28, Geopol 618, 20 [°C]

ostřivo SP 28  
množství ostřiva 5 [kg]  
pojivo Geopol 618  
množství pojiva 0,140 [kg]  
akcelerátor Geotek 007  
množství 0,035 [kg]  
teplota ostřiva 20 [°C]  
doba předmíchání 1 [min]  
doba míchání 3 [min]

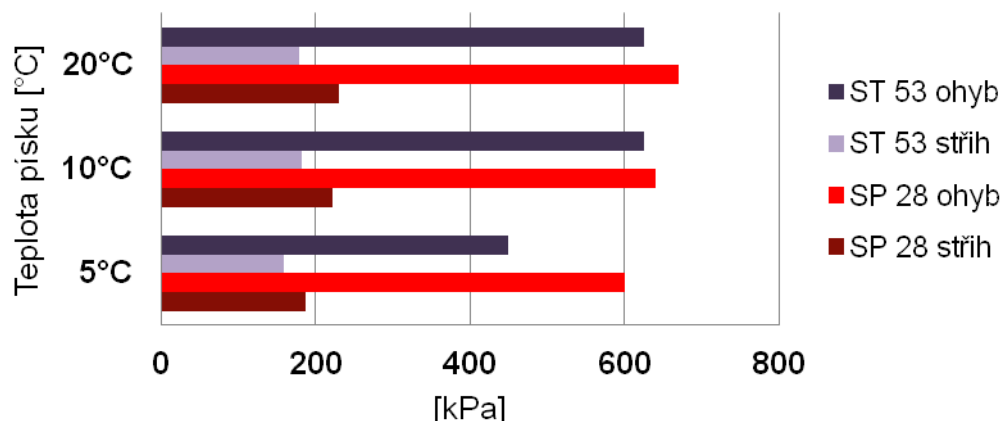
číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{30\text{min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{24\text{h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{30\text{ min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{24\text{h.}}$ [kPa]
1	230	280	600	700
2	265	280	700	700
3	225	280	750	600
4	230	285	700	700
5	245	300	700	700
6	250	280	500	750
7	200	290	700	800
8	225	280	700	500
9	230	300	650	700
10	200	285	700	650
$\bar{x}$	230	286	670	680
max	265	300	750	800
min	200	280	500	500

### 3.5.9. Vyhodnocení mechanických zkoušek CT- jádrových směsí s pojivem Geopol 618

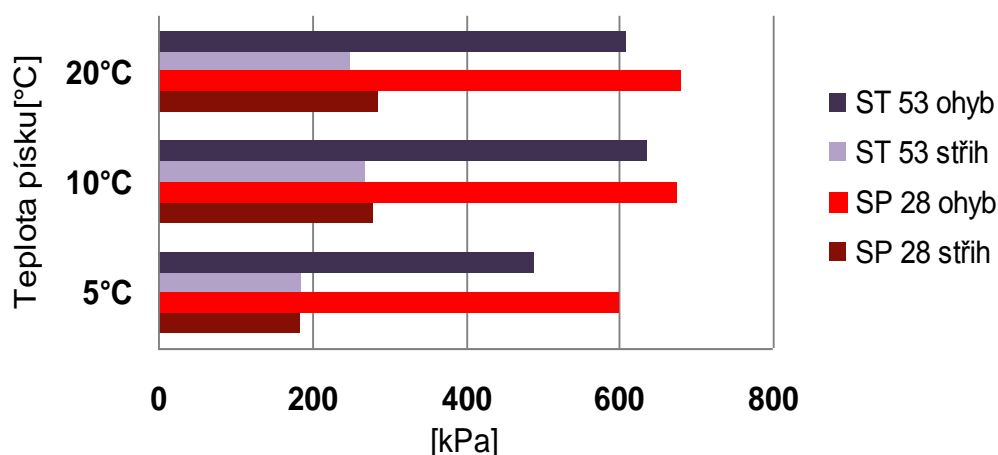
Geopolymerní jádrová směs dosahovala podobných hodnot jako organické pojivo Ecolotec, cca 300 [kPa] ve střihu, pevnost v ohybu byla nad očekávání vyšší, až 680 [kPa]. Je tedy zřejmé, že jak z pevnostního hlediska, tak i z hlediska např. životního prostředí se geopolymerní pojivo jeví jako jasná volba. S Geopolem 618 a jeho akcelerátorem Geotekem 007 se pracovalo velmi dobře, v přípravě směsi se nejevil žádný problém.

Jako u ostatních zkoumaných jádrových směsí, tak i u této byl zaznamenán výrazný pokles pevnosti ve střihu za teplot nižších než 10 [°C]. Pokles byl až o 90 [kPa]. Je velmi zajímavé, že pevnost v ohybu si ale i u nižších teplot stále jádrová směs udržovala na stejných hodnotách. Z toho vyplývá, že tvorba pojivových můstků funguje i při nižších teplotách než je teplota 10 [°C], to se projevilo jak u ostřiva SP 28, tak i ST 53. U teplot nižších jak 5 [°C] nelze zaručit propojení pojivových můstků a ani kvalitní mechanické vlastnosti.

Ve srovnání druhu písku se jeví s většími mechanickými vlastnostmi lepší slévárenský písek SP 28 s teplotami 10 až 20 [°C]. Slévárenský písek ST 53 se vyznačuje ale také velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, zejména u pevnosti v ohybu, které jsou o dost vyšší, než u ostatních jádrových směsí tvrzených pomocí CO<sub>2</sub>.



Graf. 3.5.: Srovnání mech. zkoušek směsi s pojivem Geopol 618, po 30 [min]



Graf. 3.6.: Srovnání mech. zkoušek směsi s pojivem Geopol 618, po 24 [hod]



## 3.5.10. Ostřivo ST 53, pojivo Geopol 618 – ST

**A.**

Tab.3.23.: Měření ST směsi ST 53, Geopol 618, 5 [°C]

ostřivo ST 53  
 množství ostřiva 5 [kg]  
 pojivo Geopol 618  
 množství pojiva 0,090 [kg]  
 tvrdidlo SA 75  
 množství 0,0135 [kg]  
 teplota ostřiva 5 [°C]  
 doba předmíchání 1 [min]  
 doba míchání 3 [min]  
 doba tvrdnutí 15 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{30 min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{24h.}}$ [kPa]
1	50	85	200	150
2	65	75	200	150
3	50	80	100	200
4	50	85	150	100
5	45	80	150	100
6	35	95	150	100
7	20	105	100	100
8	55	100	150	100
9	60	85	200	100
10	60	85	150	100
$\bar{x}$	49	88	155	120
max	65	105	200	200
min	20	75	100	100

**B.**

Tab.3.24.: Měření ST směsi ST 53, Geopol 618, 10 [°C]

ostřivo ST 53  
 množství ostřiva 5 [kg]  
 pojivo Geopol 618  
 množství pojiva 0,090 [kg]  
 tvrdidlo SA 75  
 množství 0,0135 [kg]  
 teplota ostřiva 10 [°C]  
 doba předmíchání 1 [min]  
 doba míchání 3 [min]  
 doba tvrdnutí 15 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{30 min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{24h.}}$ [kPa]
1	90	100	200	200
2	100	105	200	150
3	105	100	250	150
4	95	100	350	150
5	85	105	300	200
6	75	115	300	250
7	75	120	300	200
8	70	120	200	200
9	85	110	250	150
10	90	115	200	150
$\bar{x}$	87	109	255	180
max	105	120	350	250
min	70	100	200	150



**C.**

Tab.3.25.: Měření ST směsi ST 53, Geopol 618, 20 [°C]

ostřivo ST 53  
 množství ostřiva 5 [kg]  
 pojivo Geopol 618  
 množství pojiva 0,090 [kg]  
 tvrdidlo SA 75  
 množství 0,0135 [kg]  
 teplota ostřiva 20 [°C]  
 doba předmíchání 1 [min]  
 doba míchání 3 [min]  
 doba tvrdnutí 15 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{30 min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{24h.}}$ [kPa]
1	90	125	200	200
2	100	110	200	150
3	105	135	250	200
4	95	125	250	200
5	85	130	200	200
6	70	135	350	150
7	70	115	300	150
8	70	120	300	200
9	75	120	250	200
10	85	105	250	250
$\bar{x}$	<b>85</b>	<b>122</b>	<b>255</b>	<b>190</b>
max	105	135	350	250
min	70	105	200	150

## 3.5.11. Ostřivo SP 28, pojivo Geopol 618 – ST

**A.**

Tab.3.26.: Měření ST směsi SP 28, Geopol 618, 5 [°C]

ostřivo SP 28  
 množství ostřiva 5 [kg]  
 pojivo Geopol 618  
 množství pojiva 0,090 [kg]  
 tvrdidlo SA 75  
 množství 0,0135 [kg]  
 teplota ostřiva 5 [°C]  
 doba předmíchání 1 [min]  
 doba míchání 3 [min]  
 doba tvrdnutí 15 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}^{\text{24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{30 min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}^{\text{24h.}}$ [kPa]
1	70	140	250	200
2	70	135	250	200
3	65	120	200	200
4	60	145	150	150
5	75	125	350	200
6	55	135	100	150
7	70	145	250	200
8	70	140	250	200
9	65	155	200	250
10	60	165	200	200
$\bar{x}$	<b>66</b>	<b>141</b>	<b>220</b>	<b>195</b>
max	75	165	350	250
min	55	120	100	150

**B.**

Tab.3.27.: Měření ST směsi SP 28, Geopol 618, 10 [°C]

ostřivo SP 28  
 množství ostřiva 5 [kg]  
 pojivo Geopol 618  
 množství pojiva 0,090 [kg]  
 tvrdidlo SA 75  
 množství 0,0135 [kg]  
 teplota ostřiva 10 [°C]  
 doba předmíchání 1 [min]  
 doba míchání 3 [min]  
 doba tvrdnutí 15 [min]

číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	150	205	400	300
2	150	150	400	300
3	150	165	550	350
4	165	185	500	350
5	160	210	400	300
6	145	200	350	400
7	150	235	350	450
8	150	245	400	400
9	155	200	350	250
10	145	225	400	300
$\bar{x}$	<b>152</b>	<b>202</b>	<b>410</b>	<b>340</b>
max	165	245	550	450
min	145	150	350	250

**C.**

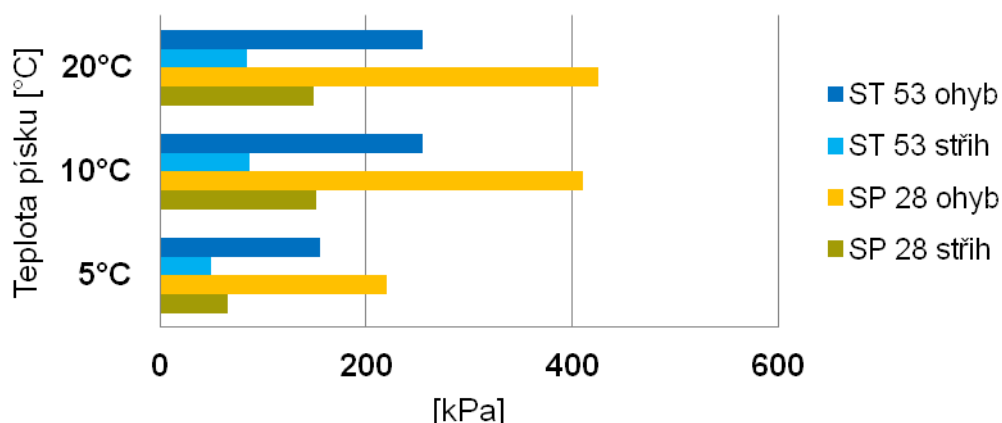
Tab.3.28.: Měření ST směsi SP 28, Geopol 618, 20 [°C]

ostřivo SP 28  
 množství ostřiva 5 [kg]  
 pojivo Geopol 618  
 množství pojiva 0,090 [kg]  
 tvrdidlo SA 75  
 množství 0,0135 [kg]  
 teplota ostřiva 20 [°C]  
 doba předmíchání 1 [min]  
 doba míchání 3 [min]  
 doba tvrdnutí 15 [min]

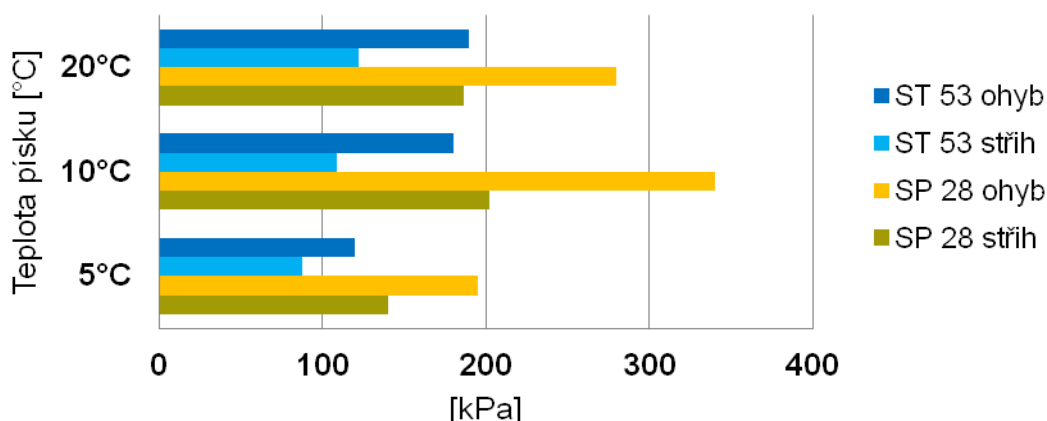
číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]
1	165	165	400	300
2	150	175	500	300
3	145	195	400	350
4	150	190	300	250
5	150	180	550	250
6	145	175	400	300
7	140	185	450	250
8	140	195	400	250
9	160	205	400	300
10	150	200	450	250
$\bar{x}$	<b>150</b>	<b>187</b>	<b>425</b>	<b>280</b>
max	165	205	550	350
min	140	165	300	250

### 3.5.12. Vyhodnocení mechanických zkoušek ST- jádrových směsí s pojivem Geopol 618

Již při výrobě zkušebních těles ze samotuhnoucí směsi byly značné problémy. Kolový mísič, ve kterém byly míchány všechny jádrové směsi tvrzené pomocí  $\text{CO}_2$  v této diplomové práci, se ukázal jako nevhodný pro rozmíchání směsí, které se tvrdí samovolně. Kolový mísič nebyl schopen dobře rozmíchat pojivo spolu s tvrdidlem v ostřivu, konzistence směsi se již zdála vadná už po hmatu. Zkušební tělesa, válečky i hranolky, se nedala vytvořit. Po několika nezdařilých pokusech se vytvořila zkušební tělesa, která zdaleka nedosahovala podobných hodnot, jako u ostatních směsí, pevnost ve stříhu nikdy nedosáhla hodnoty 200 [kPa], u ohybu lehce přesahující pevnost 300 [kPa] nebyla také brána za dostačující. Všeobecně se směs s ostřivem SP 28 jevila jako značně lepší, z grafů je opět vidět značný pokles obou pevností u teplot 5 [°C]. Z výše uvedených měření vyplývá, že samotuhnoucí směsi se mají míchat v mísiči průběžném, nikoli kolovém, aby se zaručilo kvalitní rozmíchání směsi. Tato měření nelze považovat za reálná, proto ani ve výsledném hodnocení nebudou brána v úvahu. Pro správné hodnocení samotuhnoucích směsí se tato směs vyrobila ve společnosti Unitherm, s.r.o. na mísiči průběžném, viz kapitoly 3.5.13. – 3.5.14.



Graf. 3.7.: Srovnání mech. zkoušek ST směsi s pojivem Geopol 618, po 30 [min]



Graf. 3.8.: Srovnání mech. zkoušek ST směsi s pojivem Geopol 618, po 24 [hod]

### 3.5.13. Ostřivo ST 53, pojivo Geopol 618 – ST

**A.** Tab.3.29.: Měření ST směsi ST 53, Geopol 618, 10 [°C], Unitherm, s.r.o.

ostřivo ST 53  
 pojivo Geopol 618  
 množství pojiva 1,8 [%]  
 tvrdidlo SA 75  
 množství 15 [%] na pojivo  
 teplota ostřiva 10 [°C]  
 doba tvrdnutí 15 [min]



číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH 30min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH 24h.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 30 min.}}$ [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB 24h.}}$ [kPa]
1	135	330	150	750
2	120	325	150	850
3	145	360	200	850
4	145	345	250	750
5	130	320	200	900
6	185	305	150	950
7	165	300	100	900
8	165	350	130	900
9	170	350	120	850
10	195	310	105	950
$\bar{x}$	156	330	156	865
max	195	360	250	950
min	120	300	100	750

Obr. 3-27: Zkušební tělesa ST směsi ST 53, Geopol 618, Unitherm, s.r.o.

**B.**

ostřivo ST 53  
pojivo Geopol 618  
množství pojiva 1,8 [%]  
tvrdidlo SA 75  
množství 15 [%] na pojivo  
teplota ostřiva 20 [°C]  
dobu tvrdnutí 15 [min]

Tab.3.30.: Měření ST směsi ST 53, Geopol 618, 20 [°C], Unitherm, s.r.o.

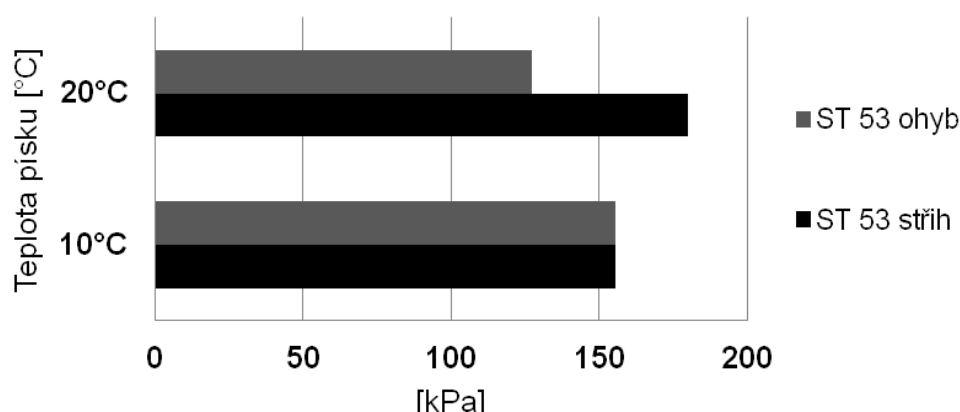
číslo měření	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 30min. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{STŘIH}}$ 48h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 30 min. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 24h. [kPa]	$\sigma_{\text{OHYB}}$ 48h. [kPa]
1	120	380	395	100	1000	700
2	155	350	355	150	850	700
3	185	330	475	200	850	800
4	155	325	355	100	850	800
5	180	350	385	130	900	800
6	210	325	445	120	950	750
7	200	300	480	100	800	700
8	190	315	470	130	950	700
9	205	350	455	125	1400	800
10	200	310	435	120	1200	700
$\bar{x}$	<b>180</b>	<b>334</b>	<b>425</b>	<b>128</b>	<b>975</b>	<b>745</b>
max	210	380	480	200	1400	800
min	120	300	355	100	800	700

### 3.5.14. Vyhodnocení mechanických zkoušek ST- jádrové směsi s pojivem Geopol 618

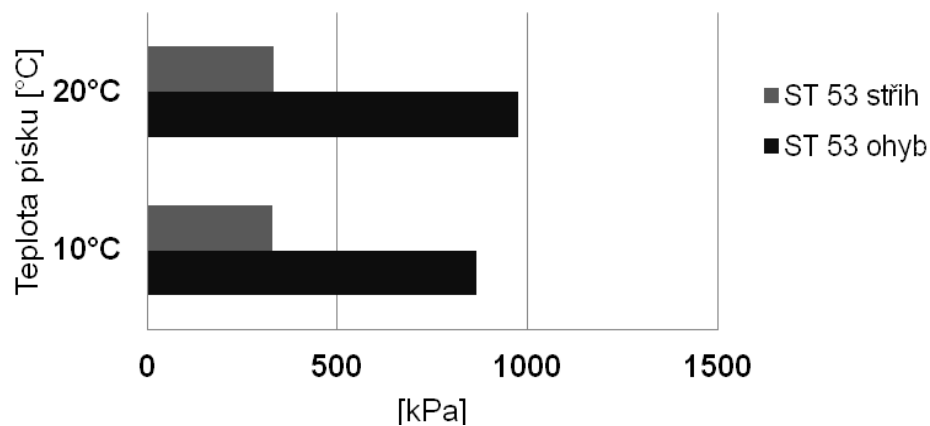
Ostřivo ST 53 s pojivem Geopol 618 se pro samotuhnoucí směs odzkoušel ve společnosti Unitherm, s.r.o., neboť TU v Liberci nevlastní průběžný mísič, který je pro samotuhnoucí směs vhodný. Vzhledem k nepřetržitému provozu se nedala odzkoušet jádrová směs s ostřivem SP 28. Zkouška byla provedena ve dvou dnech, za podobného počasí, čímž se nedala ovlivnit teplota větší hmotnosti slévárenského písku, proto nebylo možné vyrobit jádrovou směs za teploty 5 °C.

Již z výše uvedených tabulek 3.29. a 3.30. je patrné, že samotuhnoucí směs se z hlediska pevnostních podmínek jeví jako nejlepší možnou variantou.

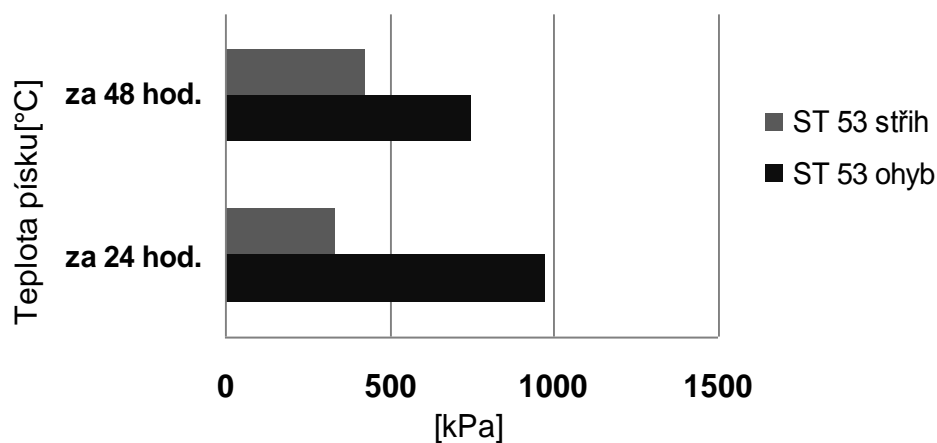
Mechanické zkoušky stříhem po 30-ti [min] dosahují obdobných hodnot, jako všechny ostatní jádrové směsi vytvrzené pomocí  $\text{CO}_2$ , a to cca 200 [kPa]. Po 24 [hod] je ale vidět znatelný nárůst až o  $\frac{1}{3}$ . Pro zajímavost bylo vytvořeno několik zkušebních těles, které byly odzkoušeny až po 48 [hod] od samovolného vytvrzení. Bylo zjištěno, že u zkoušené jádrové směsi se stále pevnost ve stříhu zvyšovala a dosahovala hodnot až o  $\frac{1}{2}$  vyšších, než u CT- směsí za 24 [hod], a to až 480 [kPa]. Pevnost ve stříhu byla po prvních 30-ti [min] zanedbatelná, dosahovala velmi malých hodnot, cca 130 [kPa], což byla v porovnání s ostatními jádrovými směsi nejmenší, hraniční hodnota. Po 24 [hod] ale pevnost v ohybu stoupla až 9 x, a tak převýšila hodnoty ostatních a dostala se tak na první místo v žebříčku nejvýhodnějších jádrových směsí z hlediska pevnostních vlastností. Za 48 [hod] se pevnost v ohybu mírně snižovala a dosáhla hodnot cca 750 [kPa], ale i tak byly pevnosti vyšší než u CT – směsí. Z toho vyplývá, že jádra vyrobená ze samotuhnoucích směsí je možné zpracovávat až druhý den od vyrobení. U jader vytvrzených pomocí metody CT se skladovatelnost jader doporučuje pouze jeden den.



Graf. 3.9.: Srovnání mech. zkoušek ST směsi s pojivem Geopol 618, po 30 [min], v Unitherm, s.r.o.



Graf. 3.10.: Srovnání mech. zkoušek ST směsi s pojivem Geopol 618, po 24 [hod], v Unitherm, s.r.o.



Graf. 3.11.: Srovnání mech. zkoušek ST směsi s pojivem Geopol 618, po 24 a 48 [hod] u teploty 20 [°C], v Unitherm, s.r.o.

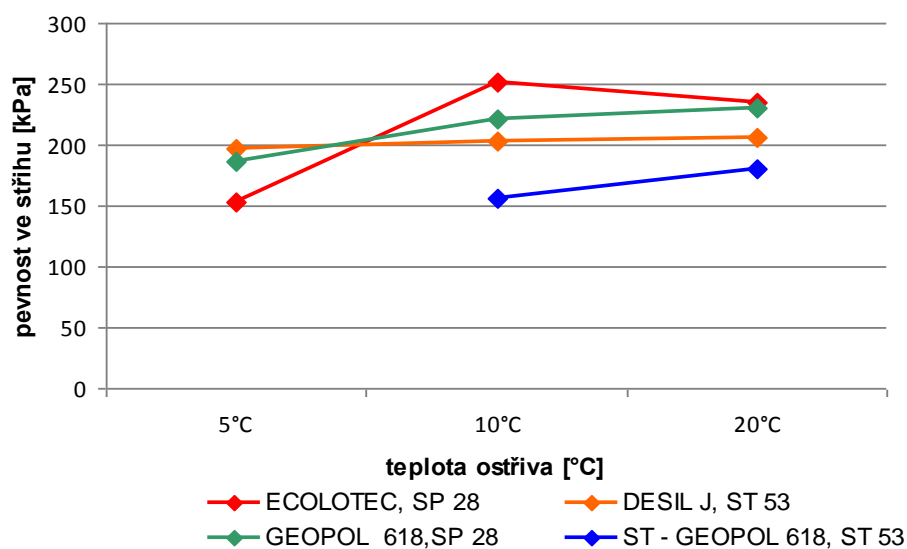
## **4. DISKUZE, VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ**

Jak je obecně známo ve slévárenské praxi, příprava jadrových a formovacích směsí je spojena s řadou technologických problémů. Tyto problémy jsou např. spojeny ve firmě Unitherm, s.r.o. s klesajícími mechanickými vlastnostmi při nízké teplotě ostřiva v zimních obdobích. Na základě této skutečnosti byly provedeny výše uvedené experimenty.

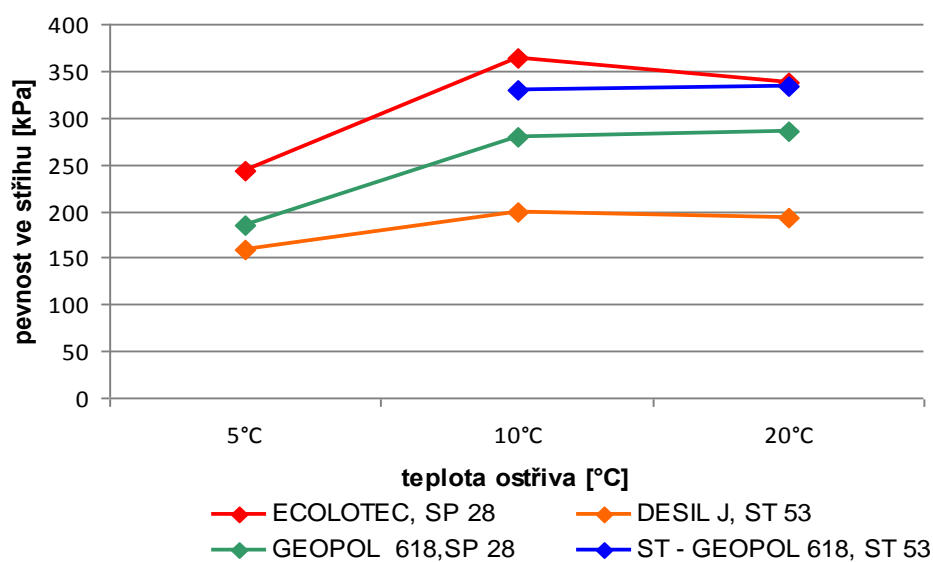
V celkovém hodnocení experimentální části byly vybrány 4 zástupci jadrových směsí, kteří se v dílčích hodnoceních vyznačovali nejvyššími pevnostními hodnotami. Zde bylo třeba posoudit, která ze směsí z hlediska pevností ve stříhu a ohybu, by se mohla doporučit společnosti Unitherm, s.r.o. Je třeba také uvážit ekologickou a finanční stránku jadrových směsí. V neposlední řadě této diplomové práce je potvrdit teorii o snižování mechanických vlastností záviselých na teplotě ostřiva, která je patrná z grafických závislostí 3.12. – 3.14.

Ze získaných hodnot je zcela zřejmé, že pevnost ve stříhu a ohybu se mírně snižuje se snižující se teplotou blížíící se k 0 [°C]. Mechanické vlastnosti všech jadrových směsí se za teploty cca 5 [°C] snižují o 1/3. U teplot 10 – 20 [°C] není výrazný nárůst, někdy je znatelný i mírný pokles pevností u teplot 20 [°C] než u teplot 10 [°C]. To lze přisoudit nepřesným měřením kolísajících teplot, neboť v experimentální části nebylo možné přesně dodržet stejných teplot u všech jadrových směsí. Snižující se mechanické vlastnosti za nízkých teplot bylo možné pozorovat u všech typů jadrových směsí, jak s organickým pojivem, tak i anorganickým, u CT i ST metody. Pevnosti ve stříhu a ohybu se snižovaly s teplotou ostřiva jak u slévárenského písku s ostrohranným zrnem, tak i u písku s kulatými zrny. Z dílčích výsledků, které jsou uvedeny za každou kapitolou zkoušení dané jadrové směsi, je zřejmé, že snížení mechanických vlastností je nepatrně větší u písku ST 53. Slévárenský písek SP 28 dosahoval skoro u všech jadrových směsí vyšších pevností. Z čehož vyplývá, že i pevnostní charakteristika jadrových směsí je dána z části i tvarem zrn slévárenského písku.

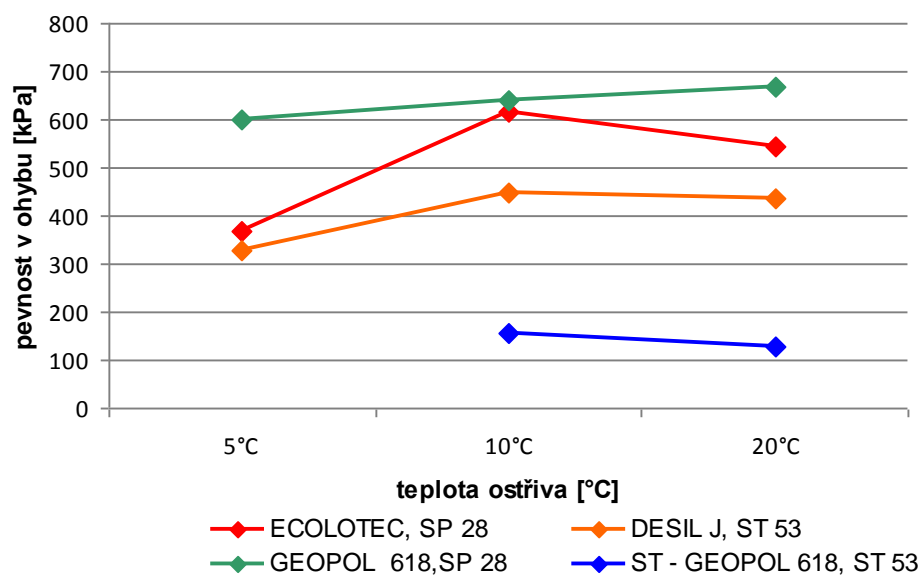




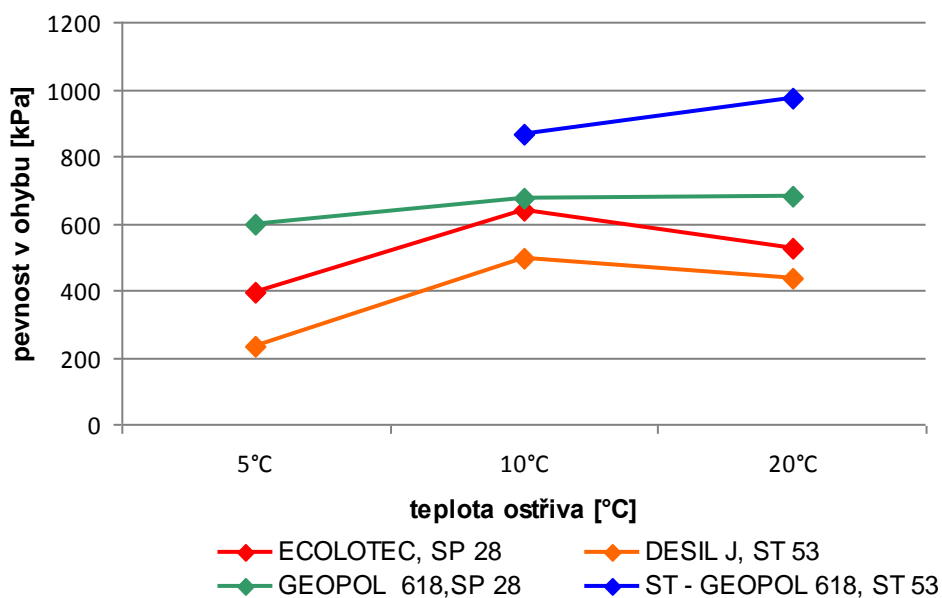
Graf. 3.12.: Vyhodnocení poklesu pevnosti ve střihu u vybraných jádrových směsí, po 30 [min]



Graf. 3.13.: Vyhodnocení poklesu pevnosti ve střihu u vybraných jádrových směsí, za 24 [hod]



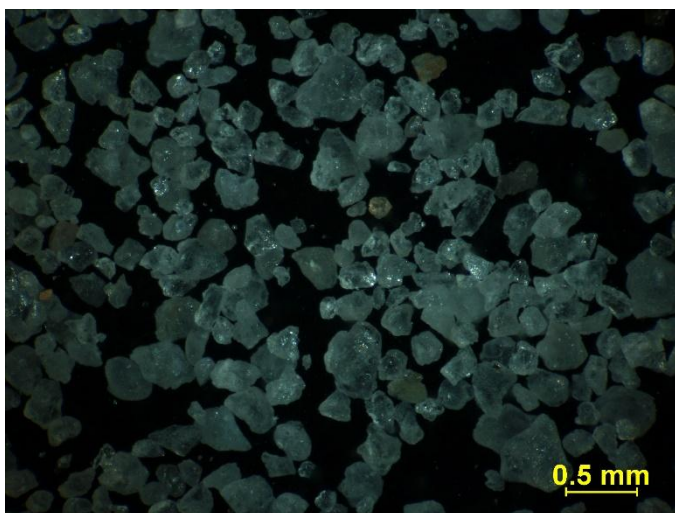
Graf. 3.14.: Vyhodnocení poklesu pevnosti v ohybu u vybraných jádrových směsí, za 30 [min]



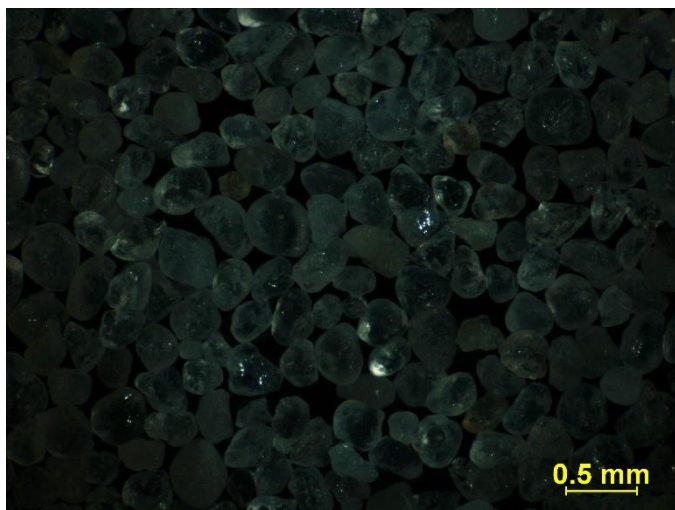
Graf. 3.15.: Vyhodnocení poklesu pevnosti v ohybu u vybraných jádrových směsí, za 24 [hod]

Tvar zrna bývá někdy vyjadřován součinitelem hranatosti, což je poměr skutečného povrchu zrn k nejmenšímu možnému povrchu, který by písek měl v případě, že by všechna jeho zrna měla tvar ideálních koulí. S ideální tvarem –

koulí se ale nedá v praxi setkat. Proto obecně platí, že kulatá zrna mají lepší vlastnosti než zrna ostrohranná. Písky s oblým tvarem zrna jsou lépe spěchovatelné, mají vyšší pevnosti za syrova. Bohužel ale také mají větší sklon ke vzniku vad souvisejících s roztažností křemene (zálupy, zadrobeniny) a vyžadují o něco větší vlhkost hlinitých směsí, a tak se doporučují spíše pro výrobu jader, než jako tvrdá složka ve formovací směsi.



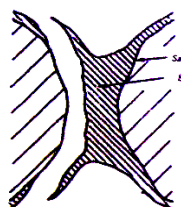
Obr. 3-28: Ostrohranná zrna slévárenského písku ST 53



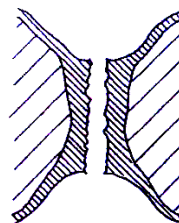
Obr. 3-29: Kulatá zrna slévárenského písku SP 28

Pevnost formovacích i jádrových směsí závisí na adhezně – kohezních silách. Kohezní porušení soudržnosti je zejména typické pro směsi s vodním sklem Desil J. Zvýšením pevnosti lze dosáhnout posílením pevnosti vlastní zrnové

obálky. Adhezní porušení soudržnosti je typické pro směsi s organickým pojivem Ecolotec a anorganickým pojivem Geopol 618. Nejdůležitější u adheze je navázání pojiva na povrch ostřiva. To je odvíjeno od počtu aktivních center na povrchu zrn ostřiva, který je omezen a závislý na lokalitě křemenného písku [28].



a)



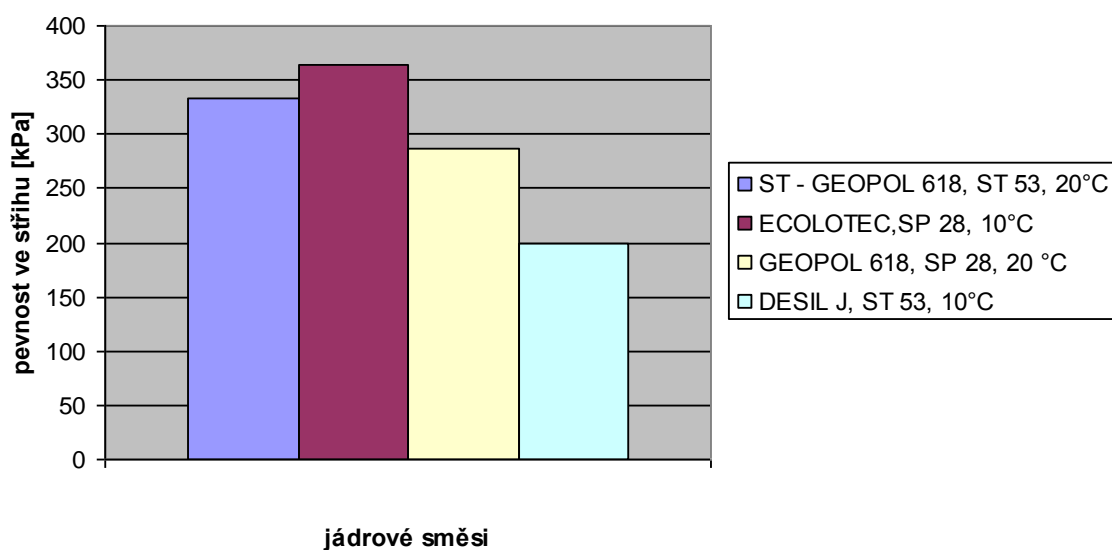
b)

Obr. 3-30: a) Adheze, b) koheze [28]

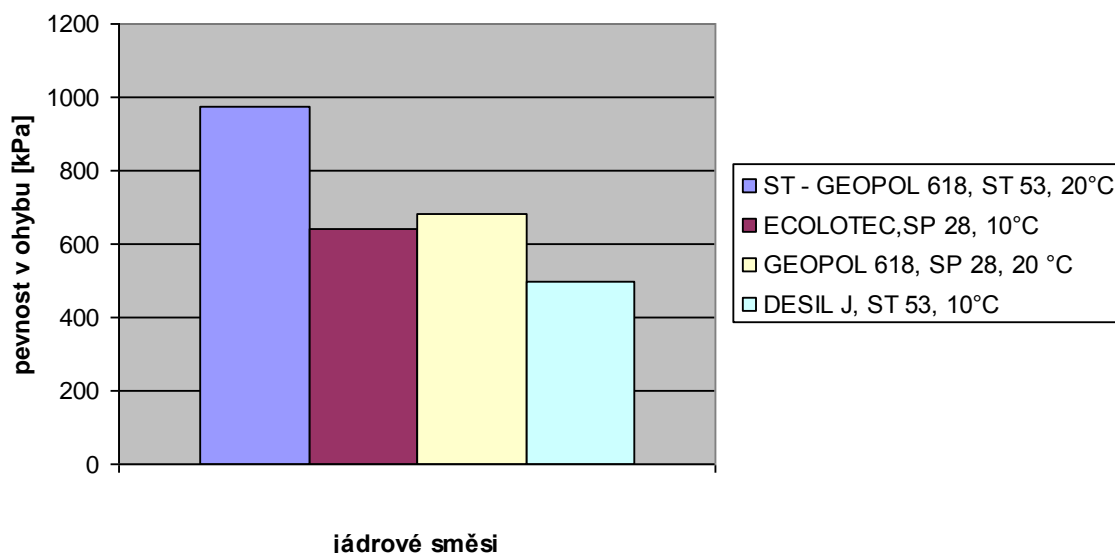
Z dílčích výsledků, které jsou za všemi měřeními každé jádrové směsi, lze vyhodnotit pokles mechanických vlastností, konkrétně pevnosti ve stříhu a ohybu u jádrových směsí, které se skládaly z ostřiva ochlazeného na teplotu 5 [°C]. Dále lze jádrové směsi zhodnotit dle pevnostní charakteristiky a vybrat pro společnost Unitherm, s.r.o. tu nejvýhodnější jádrovou směs. Z každé kategorie – jádrové směsi s určitým typem pojiva, se vybrala 1 směs s nejvyššími hodnotami naměřené v pevnosti. Ty se pak hodnotily mezi sebou a vzniklo tak pořadí 4 druhů jádrových směsí. Je nutno podotknout, že hodnocení pevnosti ve stříhu a ohybu se muselo zohlednit dohromady. Větší důraz byl kladen na pevnost ve stříhu, na který jsou jádra ve společnosti Unitherm, s.r.o. více namáhána. Ze srovnání mechanických vlastností vyplývá, že nejvyšší pevnosti ve stříhu a ohybu má samotvrdnoucí směs s ostřivem ST 53 a pojivem Geopol 618. Z grafu 3.12. je patrné, že nejvyšší pevnost ve stříhu má sice jádrová směs s pojivem Ecolotec, ale u pevnosti v ohybu daleko za samotvrdnoucí směsí zaostává. Proto v celkovém hodnocení pevnostních vlastností vítězí samotvrdnoucí směs. Je nutné říci, že díky provozním podmínkám nebylo možné uskutečnit u této samotvrdnoucí směsi měření s ostřivem SP 28. Ostřivo SP 28 se dá předpokládat jako lepší varianta pro výrobu jader, viz výše.

Tab.3.31. Srovnání mechanických vlastností u vybraných druhů jádrových směsí

Pořadí	Jádrová směs
1.	Samotvrdnoucí směs Geopol 618 + tvrdidlo SA 75, ostřivo ST 53, teplota 20 [°C]
2.	CT směs Ecolotec, ostřivo SP 28, teplota 10 [°C]
3.	CT směs Geopol 618 + Geotek 007, ostřivo SP 28, teplota 20 [°C]
4.	CT směs Desil J, ostřivo ST 53, 10 [°C]



Graf. 3.16.: Vyhodnocení pevnosti ve střihu u vybraných jádrových směsí, po 24 [hod]



Graf. 3.17.: Vyhodnocení pevnosti v ohybu u vybraných jádrových směsí, po 24 [hod]

Aby se mohl vybrat jeden typ jádrové směsi a doporučit ho pro výrobu, je potřeba kromě technologických a mechanických vlastností vyhodnotit i hledisko ekonomické stránky. Z údajů od společnosti Unitherm, s.r.o. bylo zjištěno, že cena typu ostríva ST 53 a SP 28 se od sebe moc neliší. Z tohoto důvodu byla provedena následující kalkulace ceny jednotlivých druhů pojiv.

Jelikož si firma Unitherm, s.r.o. nepřála zveřejnit nákupní ceny pojiv, uvažuje se cena jednotlivých pojiv, která je vztažena jako podíl „x“ vůči nejlevnější ceně z pojiv:

- cena 1 [kg] Desil J = x;
- cena 1 [kg] Ecolotec = 6,5 x;
- cena 1 [kg] Geopol 618 = 1,2 x;
- cena 1 [kg] Geotek 007 = 3,9 x;
- cena 1 [kg] SA 75 = 13,4 x.

Protože jádrové směsi vytvrzované pomocí  $\text{CO}_2$  se ve firmě Unitherm, s.r.o. míchají ve stejném poměru viz Tab. 3.3. na 180 [kg] hmotnosti slévárenského písku, je třeba na dané množství přepočítat i ceny pojiv. Zároveň se na stejné množství přepočte i samotvrdnoucí jádrová směs, i když se u této směsi v praxi

hmotnost ostřiva neurčuje, průběžný mísič si odebírá ostřivo z násypek. K jednotlivým jádrovým směsím se připočítávají ceny všech komponentů směsí, například pro směs s pojivem Geopol 618 se připočítává cena akceleratoru či tvrdidla. Po následném procentuelním přepočtení na hmotnost 180 [kg] ostřiva a sloučení daných materiálů do směsí viz Tab. 3.32. dochází k výsledkům cenové kalkulace, která je opět přepočtena na „y“ u nejlevnějšího pojiva a ostatní pojiva jsou jeho násobky.

Tab.3.32. Přepočet množství pojiva na váhu 180 [kg] ostřiva

Pojivo	množství pojiva udané v [%] na hmotnost ostřiva	přepočet na 180 [kg] ostřiva, udané v [kg]
Ecolotec	2 [%]	3,60 [kg]
Desil J	3,6 [%]	6,48 [kg]
Geopol 618 - CT	2,8 [%] + 0,7 [%] Geoteku 007	5,04 [kg] + 1,26 [kg] Geoteku 007
Geopol 618 - ST	1,8 [%] + 15 [%] SA 75 na váhu pojiva	3,24 [kg] + 0,486 [kg] SA 75

Výsledky cenové kalkulace:

- CT jádrová směs, Desil J = y;
- ST jádrová směs, Geopolem 618 + SA 75 = 1,6 y;
- CT jádrová směs, Geopolem 618 + Geotek 007 = 1,69 y;
- CT jádrová směs, Ecolotec = 3,61 y.

Toto srovnání cen jádrových směsí se může považovat za konečné, protože další aspekty pro cenovou kalkulaci jádra nejsou závislé na druhu ostřiva či pojiva. Po konečném uvážení všech aspektů, jako jsou fyzikální, technologické, mechanické vlastnosti a vliv teploty okolí na ostřivo a cena, lze považovat samotvrdnoucí směs s ostřivem SP 28 za teploty 10 [°C] a vyšších namíchaná s pojivem Geopol 618 spolu s tvrdidlem SA 75 za nejvýhodnější směs pro výrobu jader ve společnosti Unitherm, s.r.o. Tato jádrová směs je sice o 1,6 násobek dražší než nejlevnější směs s pojivem Desil J, ale v porovnání s pevnostními vlastnostmi se cena dá zanedbat. Pojivo Ecolotec se nedoporučuje, byť jeho



pevnosti ve stříhu a ohybu dosahovaly výborných hodnot. Ecolotec z hlediska životního prostředí je závadný, není regenerovatelný, rozebíratelnost jader je velmi pracná a jeho cena je velmi vysoká oproti ostatním. Po zohlednění mechanického, technologického i ekonomického hlediska lze směs s pojivem Geopol 618 + Geotek 007 považovat za též velmi vhodnou pro vytvrzování pomocí  $\text{CO}_2$ .

Při celkovém srovnání metody ST a metody CT pro společnost Unitherm, s.r.o. se doporučuje zatím více používat metody CT z důvodu, že společnost Unitherm, s.r.o. nevlastní více stejných jaderníků pro výrobu jednoho odlitku. Za další nevýhodu se považuje u ST metody regenerace ostříva. Tu se zatím ve společnosti Unitherm, s.r.o. nedaří zpracovat v průběžném mísiči. V současnosti standardně používané regenerace ve slévárnách nedokáží dostatečně odstranit pojivovou obálku ostříva a dochází k velkému odpadu regenerované směsi. Vyvíjí se nová technologie regenerace, která spočívá v intenzivní mechanické otírce. Některé zahraniční firmy přistupují i k tepelné regeneraci. V podmínkách tuzemských sléváren bohužel s touto tepelnou regenerací nejsou žádné zkušenosti. Za nejlepší řešení se proto ve společnosti Unitherm, s.r.o. považuje buď kombinace ST a CT směsí ve výrobě, nebo samotná CT metoda. V budoucnosti se ale slévárny budou nuceny problémem regenerace zabývat, aby snížily obrovské množství odpadů, které v současnosti produkují. Zároveň tím sníží i obrovské náklady, které při likvidaci těchto odpadů vznikají.



## **5. ZÁVĚR**

V diplomové práci byla nejprve v teoretické části provedena rešerše výroby jádrových směsí z různých druhů pojiv a ostřiv, následně popsány jednotlivé způsoby výroby jader. V této části je prezentován i vliv teploty okolí na jednotlivé složky jádrové směsi z čistě teoretického hlediska, které poukazuje na případný vliv teploty okolí na ostřivo.

Experimentální část se zabývala touto problematikou na 6–ti typech zkoumaných jádrových směsí. Jádrové směsi se skládaly z 2 druhů slévárenského písku – ostřiva (s ostrohrannými a kulatými zrny) různé teploty, ze 3 druhů pojiv organického či anorganického charakteru. Tyto směsi se následně buď vytvrdily pomocí CO<sub>2</sub>, či se vytvrdily samovolně a následně na vytvořených tělesech ze zkoušených jádrových směsí byla provedena měření mechanických vlastností, konkrétně pevnosti ve stříhu a pevnosti v ohybu. Experimentální část měla za úkol potvrdit či vyvrátit teorii, která tvrdí, že při nižších teplotách ostřiva dochází ke snížení mechanických vlastností. Zároveň se stanovilo, která z jádrových směsí byla z hlediska konkrétních mechanických vlastností nejvýhodnější pro výrobu jader určených k výrobě odlitků ze slitin hliníku ve společnosti Unitherm, s.r.o. Aby se tvrzení potvrdilo a vybrala nejvýhodnější směs, bylo vyrobeno 1060 zkušebních těles, které byly prohlédnuty a schváleny za kvalitně vyrobené a vhodné ke zkouškám.

Z výsledného hodnocení vyplývá, že experimentální část potvrzuje teorii. Za nižších teplot ostřiva, než je teplota 10 [°C] se potvrzuje, že mechanické vlastnosti, zejména pevnosti, klesají a proto je důležité, aby slévárenský písek skladovaný v zásobnících, byl zejména v zimních obdobích vyhříván. Toto tvrzení se potvrdilo u všech jádrových směsí, které byly vytvrzeny pomocí CO<sub>2</sub>. U samotuhnoucí jádrové směsi se toto nedalo hodnotit, neboť směs byla namíchána ve společnosti Unitherm, s.r.o. na průběžném mísiči, kde nebylo možné předem stanovit teplotní podmínky. Ale vzhledem k tomu, že u všech ostatních směsí se toto tvrzení potvrdilo, je na místě se přiklánět k tomu, že i u samotuhnoucích směsí se mechanické vlastnosti za nižších teplot budou snižovat.

U vyšších i nižších teplot ostřiva bylo zjištěno, že pevnost ve stříhu i ohybu je menší u slévárenského písku, resp. ostřiva ST 53 s ostrohrannými zrny, než u ostřiva SP 28 se zrny kulatými. Lepší mechanické vlastnosti u ostřiva SP 28 s kulatými zrny jsou dané lepší spěchovatelností. Na základě většího zhutnění se tím ale sníží prodyšnost. Hranatá zrna ostřiva se při pēchování vzpřící, mezi nimi se vytvářejí daleko větší póry než u kulatých zrn ostřiva a tak jsou více prodyšné. Za nejideálnější tvar zrna by byla považována koule, která by svým zaobleným tvarem a hladkým povrchem byla pro jádrové směsi nejvýhodnější, což ale v praxi není možné.

Ze všech druhů jádrových směsí byl z každé kategorie vybrán jeden typ s nejvyššími hodnotami pevnosti ve stříhu a ohybu a následně se mezi sebou zhodnotily. Za nejpevnější jádrovou směs ve stříhu i ohybu se považuje směs samotvrdnoucí, tvořená z ostřiva ST 53 a pojiva Geopol 618 spolu s tvrdidlem SA 75, za teploty ostřiva 20 [°C]. Je více než možné, že tato směs by dosahovala vyšších hodnot s ostřivem SP 28, které mělo u jiných jádrových směsí vždy vyšší hodnoty. U této zkoušky použití ostřiva SP 28 nebylo možné viz výše. O druhé a třetí místo pevnostních vlastností se dělí geopolymerní směs tvrzená pomocí CO<sub>2</sub> a směs s organickým pojivem Ecolotec. Byť pojivo Ecolotec dosahuje lepších hodnot než Geopol 618, tak vzhledem k organickému původu je nutno zohlednit dopad na životní prostředí. Když se srovná rozpadavost jader a cena přepočtená na 1 [kg] pojiv, jsou náklady nejvyšší. S nejnižšími pevnostními hodnotami se umístily jádrové směsi spojené anorganickým pojivem Desil J, u kterých se dá ale vyzdvihnout jejich výborná zpracovatelnost a dobrá rozpadavost. Desil J lze využívat pro velikostně menší typy jader, které nepotřebují mít velkou pevnost, protože se s nimi manipuluje lehčeji, než s jádry většího charakteru.

Vyhodnocením těchto zkoumaných jádrových směsí se došlo k závěru, že teplota 10 [°C] je hraniční pro zpracování ostřiva, neboť u nižších teplot byl vysledován pokles hodnot mechanických vlastností, konkrétně pevností ve stříhu a ohybu. Doporučuje se proto uskladňovat slévárenský písek ve vyhříváných či aspoň zaizolovaných zásobnících. Z hlediska tvaru zrna se doporučuje slévárenský písek SP 28 pro kulatý tvar zrna blížíci se více kouli, než tvar zrna slévárenského písku ST 53. Po celkovém zohlednění pevnostních hodnot,



zpracovatelnosti, rozpadavosti jader a ceně se doporučuje samotuhnoucí jádrová směs s ostřivem SP 28, pojivem Geopol 618 a tvrdidlem SA 75, popřípadě jádrová směs tvrzená pomocí  $\text{CO}_2$  ve složení ostřivo SP 28, pojivo Geopol 618 s akcelerátorem Geotek 007. Lze předpokládat, že pro sériovou výrobu je výhodnější CT směs, neboť u ní se nepotřebuje velké množství stejných jaderníků, jako je to u samotuhnoucích směsí. Za nejlepší řešení se považuje kombinace ST a CT uvedených jádrových směsí. U obou doporučovaných jádrových směsí se doporučuje teplota ostřiva vyšší jak  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  včetně, aby se zabránilo snižování mechanických vlastností. Pro společnost Unitherm, s.r.o. by se z hlediska pevnostních podmínek daly samotuhnoucí směsi doporučit, ale díky špatnému zregenerování směsi, které je pro firmu Unitherm s.r.o. stěžejní, se zatím doporučuje setrvání u CT směsí a vyčkání na další zkoušky na zregenerovatelném slévárenském písku využitelném pro výrobu jader od dodavatelských firem, které se zabývají zavedením ST směsí do provozu sléváren.



## **6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] NOVÁ, I.: *Teorie slévání I. – Teoretické základy technologických procesů*. TU v Liberci, 2006, 163 s., ISBN 80-7372-149-X.
- [2] JELÍNEK, P.: *Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí – Ostřiva*. Vydáno vlastním nákladem, Ostrava, červen 2000, 138s, ISBN 80-238-6118-2.
- [3] HLAVÁČ, J.: *Základy technologie silikátů*. Praha, SNTL, 1988, 516 s.
- [4] KYSILKA, J.: *Polysacharidy rostlinného původu – Škroby*. [cit. 2013-08-28]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.biotox.cz/naturstoff/chemie/default.html>
- [5] JELÍNEK, P.: *Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí (Chemie slévárenských pojiv)*. Vydáno vlastním nákladem, Ostrava, 2004, 241s., ISBN 80-239-2188-6.
- [6] VETÍŠKA, A. a kol.: *Teoretické základy slévárenské technologie*. SNTL/Alfa, Praha, 1972, 388 s.
- [7] DELLA, M. R.: *Alkali-activated cements, Opportunities and challenges, Cement and Concrete Research*, The Pennsylvania State University 1988, no. 29, p. 249-254.
- [8] PACHECO-TOGAL, F., CASTRO-GOMAS, J., JALALI, S.: *Alkali activated binders, Part 2. About materials and binders manufacture*, Construction and Building Materials, 2007, p.6.
- [9] OPRAVIL, T., BRANDŠTET, J., HAVLICA J., FRANK, V.: *Geopolymerie na bázi metakaolinu aktivovaného sodnými a draselnými sloučeninami. Metakaolin 2008, Sborník příspěvků semináře*. Brno, 2008, s. 86, ISBN 978-80-214-3582-7.
- [10] CUPÁK, P., RUSÍN, K.: *Zkušenosti s výrobou jader a použití jader s boigenním pojivem*. Slévárenství, 2006, s.19-21, ISSN 0037-6825.
- [11] PÍŠEK, F., PLEŠINGER, A.: *Slévárenství – II. Speciální část, Technický průvodce 21b.*, SNTL, Praha, 1975, 403s.
- [12] CHRÁST, J.: *Slévárenská zařízení*. Akademické naklad. CERM, Brno, 2006, 256 s., ISBN 80-7204-456-7.
- [13] HORÁČEK, M.: *Slévárenská technologie*. VUT, Brno, 1990, ISBN 55-630/1-90.



- [14] ŠEBESTA, B.: *Technický pohled na přístroje pískové laboratoře – Sand Team*. Sborník přednášek Keramost, Keramost a.s., Most, 2007, s. 35-41, ISBN 978-80-254-0085-2.
- [15] KAISR, J.: *Sledování základních vlastností slévárenských ostřív*, Bakalářská práce, TU v Liberci, 2012.
- [16] PÍŠEK, F., PLEŠINGER, A.: *Slévárenství – I. Obecná část, Technický průvodce 21a.*, SNTL, Praha, 1974, 499s.
- [17] SKLOPÍSEK STŘELEČ, a.s.: *Materiálový list*. [cit. 2013-10-04]. Dostupné z: <<http://www.glassand.eu/files/krivky/ST%2053.pdf>>
- [18] SAND TEAM, s.r.o.: *Materiálový list*. [cit. 2013-10-04]. Dostupné z: <<http://sandteam.cz/nase-sluzby/sp-28>>
- [19] FOSECO GmbH: *Bezpečnostní list Ecolotec 898*. Materiál firmy Unitherm, s.r.o., Příkazy, 2007, 7s.
- [20] Vodní sklo Brno, a.s.: *Bezpečnostní list Desil J*. Materiál firmy Unitherm, s.r.o., Brno, 2004, 6s.
- [21] SAND TEAM, s.r.o.: *Technický list Geopol 618*. Materiál firmy Unitherm, s.r.o., Holubice, 2008, 1s.
- [22] SAND TEAM, s.r.o.: *Bezpečnostní list Geotek 007*. Materiál firmy Unitherm, s.r.o., Holubice, 2008, 5s.
- [23] SAND TEAM, s.r.o.: *Bezpečnostní list SA 75*. Materiál firmy Unitherm, s.r.o., Holubice, 2008, 5s.
- [24] MULTISERW-Morek: *Kontrolní a měřicí přístroje pro pískovou laboratoř*. Propagační materiál, Brzeźnica – PL.
- [25] GIFOS, s.r.o.: *Návod k používání – Průběžný mísič MGİ 03L*. Brno, 2013, 13s.
- [26] VOLT CRAFT, s.r.o.: *IR teploměr s kamerou IR1000-50CAM*. [cit. 2013-10-18]. Dostupné z: <<http://www.voltcraft.cz/ir-teplomer-s-kamerou-ir1000-50cam.k100959>>
- [27] FOŠUM, J., ŠEBESTA B.: *Současné a perspektivní metody zkoušení formovacích materiálů ve slévárnách*. Slévárenství, 10/2003, s.410-415.
- [28] BURIAN, A., PŘEROVSKÁ, M., KAJZAROVÁ, M.: *Technologie Geopol – vliv aktivního atritoru na využitelnost regenerátu a vlastností směsi*. Sborník přednášek, 50. Slévárenské dny – sekce formovací materiály, Brno, 2013, s. 22.



## **SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 2-1: Tepelná dilatace některých druhů slévárenských ostřiv [2].....	14
Obr. 2-2: Struktura $\alpha$ - cristobalit [2] .....	15
Obr. 2-3: Vliv tvaru ostřiva na mechanické vlastnosti formovací směsi [1] .....	18
Obr. 2-4: Stručný přehled vývoje pojiv formovacích směsí [1] .....	19
Obr. 2-5: Průběh ztvrdování vodního skla CO <sub>2</sub> [16].....	26
Obr. 2-6: Vstřelovací stroj s vstřelovacím ventilem [12].....	30
Obr. 2-7: Průběh zbytkové pevnosti CT směsi s vodním sklem v závislosti na teplotě .....	31
Obr. 2-8: Zkušební tělesa [14].....	34
Obr. 2-9: Přístroje na zkoušení pevnosti [14].....	36
Obr. 2-10: Přístroj na stanovení prodyšnosti Multiserw- Morek [14] .....	37
Obr. 2-11: Přístroj na stanovení vlhkosti směsi [14] .....	37
Obr. 3-1: Tabulka síťového rozboru [17] .....	40
Obr. 3-2: Graf síťového rozboru [17] .....	40
Obr. 3-3: Chemická analýza a další parametry [17].....	41
Obr. 3-4: Ukázka tvaru zrna SP 28 [18] .....	41
Obr. 3-5: Síťový rozbor ostřiva [18] .....	42
Obr. 3-6: Ukázka amorfní struktury pojiva Geopol 618 [21].....	44
Obr. 3-7: Přístroj na měření pevnosti ve střihu (pozice R <sub>I</sub> II), v ohybu (pozice R <sub>g</sub> ) .....	45
Obr. 3-8: Umístění zkušebních těles, a) pevnost ve střihu, b) pevnost v ohybu .....	46
Obr. 3-9: Laboratorní kolový mísič LM-2e, umístěný v laboratoři Katedry strojírenské technologie.....	47
Obr. 3-10: Ilustrační foto průběžného mísiče od firmy Gifos, s.r.o. [25] .....	48
Obr. 3-11: a) Šesti-násobný jaderník pro zkušební těleso – váleček, b) zámky jaderníku, c) univerzální mrazící destička .....	49
Obr. 3-12: Dvoj-násobný jaderník pro zkušební těleso – hranol .....	49
Obr. 3-13: Digitální váhy Radwag .....	50
Obr. 3-14: Laboratorní mraznička .....	51
Obr. 3-15: IR - teploměr s kamerou [26] .....	52



Obr. 3-16: Upěchování písku.....	54
Obr. 3-18: Vytvrzování pomocí CO <sub>2</sub> .....	54
Obr. 3-20: Schéma vyrobených jádrových směsí a mechanických zkoušek .....	56
Obr. 3-21: Zkušební tělesa směsi ST 53, Ecolotec.....	57
Obr. 3-22: Zkušební tělesa směsi SP 28, Ecolotec .....	58
Obr. 3-23: Zkušební tělesa směsi ST 53, Desil J.....	62
Obr. 3-24: Zkušební tělesa směsi SP 28, Desil J .....	63
Obr. 3-25: Zkušební tělesa směsi ST 53, Geopol 618.....	66
Obr. 3-26: Zkušební tělesa směsi SP 28, Geopol 618 .....	68
Obr. 3-27: Zkušební tělesa ST směsi ST 53, Geopol 618, Unitherm, s.r.o. ....	75
Obr. 3-28: Ostrohranná zrna slévárenského písku ST 53.....	82
Obr. 3-29: Kulatá zrna slévárenského písku SP 28.....	82
Obr. 3-30: a) Adheze, b) koheze [28].....	83



## **SEZNAM TABULEK**

Tab.2.1.: Příklady vhodného chemického složení strusek pro samovolně tvrdnoucí směsi s vodním sklem [16] .....	25
Tab.3.1.: Charakteristické chemické a fyzikální vlastnosti [18] .....	41
Tab.3.2.: Charakteristická granulometrická skladba [18] .....	42
Tab.3.3.: Přepočet množství pojiva na váhu 5 [kg] ostřiva .....	53
Tab.3.4.: Celkový počet vytvořených zkušebních těles .....	56
Tab.3.5.: Měření směsi ST 53, Ecolotec, 5 [°C] .....	57
Tab.3.6.: Měření směsi ST 53, Ecolotec, 10 [°C] .....	57
Tab.3.7.: Měření směsi ST 53, Ecolotec, 20 [°C] .....	58
Tab.3.8.: Měření směsi SP 28, Ecolotec, 5 [°C] .....	58
Tab.3.9.: Měření směsi SP 28, Ecolotec, 10 [°C] .....	59
Tab.3.10.: Měření směsi SP 28, Ecolotec, 20 [°C] .....	59
Tab.3.11.: Měření směsi ST 53, Desil J, 5 [°C] .....	62
Tab.3.12.: Měření směsi ST 53, Desil J, 10 [°C] .....	62
Tab.3.13.: Měření směsi ST 53, Desil J, 20 [°C] .....	63
Tab.3.14.: Měření směsi SP 28, Desil J, 5 [°C] .....	63
Tab.3.15.: Měření směsi SP 28, Desil J, 10 [°C] .....	64
Tab.3.16.: Měření směsi SP 28, Desil J, 20 [°C] .....	64
Tab.3.17.: Měření směsi ST 53, Geopol 618, 5 [°C] .....	66
Tab.3.18.: Měření směsi ST 53, Geopol 618, 10 [°C] .....	67
Tab.3.19.: Měření směsi ST 53, Geopol 618, 20 [°C] .....	67
Tab.3.20.: Měření směsi SP 28, Geopol 618, 5 [°C] .....	68
Tab.3.21.: Měření směsi SP 28, Geopol 618, 10 [°C] .....	68
Tab.3.22.: Měření směsi SP 28, Geopol 618, 20 [°C] .....	69
Tab.3.23.: Měření ST směsi ST 53, Geopol 618, 5 [°C] .....	71
Tab.3.24.: Měření ST směsi ST 53, Geopol 618, 10 [°C] .....	71
Tab.3.25.: Měření ST směsi ST 53, Geopol 618, 20 [°C] .....	72
Tab.3.26.: Měření ST směsi SP 28, Geopol 618, 5 [°C] .....	72





Tab.3.27.: Měření ST směsi SP 28, Geopol 618, 10 [°C] .....	73
Tab.3.28.: Měření ST směsi SP 28, Geopol 618, 20 [°C] .....	73
Tab.3.29.: Měření ST směsi ST 53, Geopol 618, 10 [°C], Unitherm, s.r.o.....	75
Tab.3.30.: Měření ST směsi ST 53, Geopol 618, 20 [°C], Unitherm, s.r.o.....	76
Tab.3.31. Srovnání mechanických vlastností u vybraných druhů jádrových směsí.....	84
Tab.3.32. Přepočet množství pojiva na váhu 180 [kg] ostřiva .....	86



## **SEZNAM GRAFŮ**

Graf. 3.1.: Srovnání mechanických zkoušek směsi s pojivem Ecolotec, po 30 [min] od vytvrzení.....	61
Graf. 3.2.: Srovnání mechanických zkoušek směsi s pojivem Ecolotec, po 24 [hod] od vytvrzení.....	61
Graf. 3.3.: Srovnání mechanických zkoušek směsi s pojivem Desil J, po 30 [min] .....	65
Graf. 3.4.: Srovnání mechanických zkoušek směsi s pojivem Desil J, po 24 [hod] .....	66
Graf. 3.5.: Srovnání mech. zkoušek směsi s pojivem Geopol 618, po 30 [min].....	70
Graf. 3.6.: Srovnání mech. zkoušek směsi s pojivem Geopol 618, po 24 [hod].....	70
Graf. 3.7.: Srovnání mech. zkoušek ST směsi s pojivem Geopol 618, po 30 [min] .....	74
Graf. 3.8.: Srovnání mech. zkoušek ST směsi s pojivem Geopol 618, po 24 [hod].....	75
Graf. 3.9.: Srovnání mech. zkoušek ST směsi s pojivem Geopol 618, po 30 [min], v Unitherm, s.r.o.....	77
Graf. 3.10.: Srovnání mech. zkoušek ST směsi s pojivem Geopol 618, po 24 [hod], v Unitherm, s.r.o.....	78
Graf. 3.11.: Srovnání mech. zkoušek ST směsi s pojivem Geopol 618, po 24 a 48 [hod] u teploty 20 [°C], v Unitherm, s.r.o. ....	78
Graf. 3.12.: Vyhodnocení poklesu pevnosti ve stříhu u vybraných jádrových směsí, po 30 [min].....	80
Graf. 3.13.: Vyhodnocení poklesu pevnosti ve stříhu u vybraných jádrových směsí, za 24 [hod] .....	80
Graf. 3.14.: Vyhodnocení poklesu pevnosti v ohybu u vybraných jádrových směsí, za 30 [min].....	81
Graf. 3.15.: Vyhodnocení poklesu pevnosti v ohybu u vybraných jádrových směsí, za 24 [hod] .....	81
Graf. 3.16.: Vyhodnocení pevnosti ve stříhu u vybraných jádrových směsí, po 24 [hod] ..	84
Graf. 3.17.: Vyhodnocení pevnosti v ohybu u vybraných jádrových směsí, po 24 [hod] ...	85

## **Prohlášení**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucí diplomové práce a konzultantem.

Datum: 03.01.2014

Podpis:

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I use inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Datum: 03.01.2014

Signature: